

# Entwicklung eines Trainingssimulators für den Solarfeld- und Speicherbetrieb eines solarthermischen Parabolrinnenkraftwerks

Timo Hirsch

Konstanz, 01.08.2017

BACHELORARBEIT





# Bachelorarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

## Bachelor of Engineering (B.Eng.)

an der

## Hochschule Konstanz

Technik, Wirtschaft und Gestaltung

Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik

Studiengang Elektrotechnik und Informationstechnik

Thema: **Entwicklung eines Trainingssimulators für den Solarfeld-  
und Speicherbetrieb eines solarthermischen  
Parabolrinnenkraftwerks**

Bachelorkandidat: Timo Hirsch  
Ringstraße 7, 73527 Schwäbisch Gmünd

1. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Richard Leiner

2. Prüfer: Dr.-Ing. Jan Fabian Feldhoff  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)  
Institut für Solarforschung  
Wankelstraße 5, 70563 Stuttgart

Ausgabedatum: 01.05.2017

Abgabedatum: 01.08.2017





# Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, Timo Hirsch, geboren am 29.08.1992 in Mutlangen,

- (1) dass ich meine Bachelorarbeit mit dem Titel:

**„Entwicklung eines Trainingssimulators für den Solarfeld- und Speicherbetrieb eines solarthermischen Parabolrinnenkraftwerks“**

am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt unter Anleitung von Prof. Dr.-Ing. Richard Leiner selbständig und ohne fremde Hilfe angefertigt habe und keine anderen als die angeführten Hilfen benutzt habe;

- (2) dass ich die Übernahme wörtlicher Zitate, von Tabellen, Zeichnungen, Bildern und Programmen aus der Literatur oder anderen Quellen (Internet) sowie die Verwendung der Gedanken anderer Autoren an den entsprechenden Stellen innerhalb der Arbeit gekennzeichnet habe.

Ich bin mir bewusst, dass eine falsche Erklärung rechtliche Folgen haben wird.

Konstanz, 01.08.2017

Timo Hirsch



# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner studentischen Tätigkeit am Institut für Solarforschung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR).

An dieser Stelle möchte ich mich ausdrücklich bei meinem Betreuer Herrn Dr.-Ing. Jan Fabian Feldhoff für die hervorragende Unterstützung beim Anfertigen dieser Arbeit bedanken.

Weiterer Dank geht an Herrn Prof. Dr.-Ing. Richard Leiner für sein Engagement und die Betreuung meiner Arbeit.

Nicht zuletzt gilt mein Dank Herrn Dr.-Ing. Tobias Hirsch, Herrn Kareem Noureldin und Herrn Daniel Högemann sowie allen weiteren Mitarbeitern der Abteilung für ihre freundliche Unterstützung und die gute Zusammenarbeit.



# Zusammenfassung

Thema:	Entwicklung eines Trainingssimulators für den Solarfeld- und Speicherbetrieb eines solarthermischen Parabolrinnenkraftwerks
Bachelorkandidat:	Timo Hirsch
Institution:	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) Institut für Solarforschung, Linienfokussierende Systeme
Betreuer:	Prof. Dr.-Ing. Richard Leiner (HTWG Konstanz)
Abgabedatum:	01.08.2017
Schlagworte:	Simulator, Solarthermie, Parabolrinnenkraftwerk, Wärmeträgermedium, Salzschnelze, Virtual Solar Field, Solarfeld, Speichersystem, Pilotanlage, EMSP, HPS 2, Évora

Im Zuge des Verbundprojekts *HPS 2* errichtet das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) im portugiesischen Évora eine Versuchsplattform für den Test von mit Salzschnelze betriebenen Parabolrinnensystemen.

Zur Schulung des Betriebspersonals soll ein Trainingssimulator bereitstehen, der eine Übersicht über das Bedienkonzept der Anlage gewährleistet und es den Ingenieuren und Technikern ermöglicht, sich ein prinzipielles Verständnis über das Verhalten des Solarfeldes anzueignen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die Konzeption und Entwicklung dieser Simulationssoftware, mit Beschränkung auf das Solarfeld- und Speichersystem der Anlage, vorgenommen. Die Implementierung der Software erfolgte hierbei vollständig in LabVIEW® und orientiert sich am Steuer- und Bedienkonzept der realen Anlagen.

Das resultierende Tool erlaubt dem Benutzer das Durchführen von Simulationen über eine der realen Leitsystem-Bedienoberfläche nachempfundenen Simulator-Umgebung. Damit können verschiedene Umwelteinflüsse, Störszenarien und darüber hinaus vollständige Tagesverläufe basierend auf realen Messdaten nachgebildet werden.



# Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung.....	I
Vorwort .....	II
Zusammenfassung .....	III
Inhaltsverzeichnis.....	IV
Abkürzungsverzeichnis.....	VII
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Solarforschung am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) .....	1
1.2 Motivation.....	2
1.3 Zielsetzung.....	4
<b>2 Grundlagen der Arbeit .....</b>	<b>7</b>
2.1 Solarthermische Parabolrinnenkraftwerke.....	7
2.2 Versuchsanlage Évora Molten Salt Platform .....	9
2.3 Simulationsmodell Virtual Solar Field .....	11
2.3.1 Individualisiertes VSF-Modell für Testanlage .....	12
2.3.2 Kommunikationsschnittstelle zu LabVIEW® .....	16
<b>3 Konzeption des Simulators .....</b>	<b>19</b>
3.1 Zu realisierendes Anlagenmodell.....	19
3.2 Resultierende Anforderungen an die Simulationssoftware.....	23
3.2.1 Funktionale Anforderungen .....	23
3.2.2 Nicht-funktionale Anforderungen.....	26
3.3 Grundlegende Designentscheidungen .....	27
3.3.1 Systemarchitektur.....	27
3.3.2 Kommunikation mit Virtual Solar Field .....	31

3.3.3	Bedienoberfläche.....	33
<b>4</b>	<b>Umsetzung.....</b>	<b>35</b>
4.1	Physikalisches Modell.....	36
4.1.1	Kollektoren.....	37
4.1.2	Zwei-Tank-Salzspeichersystem.....	41
4.1.3	Pumpen.....	45
4.1.4	Ventile und Massenströme.....	46
4.1.5	Dampferzeugersystem.....	52
4.2	Leittechnik.....	53
4.2.1	Bedienoberfläche.....	53
4.2.2	Massenstrom-Regler.....	56
4.2.3	Schutzfunktionen der Kollektoren.....	57
4.3	Elementare Anwendungsfunktionen.....	59
4.3.1	Initialisierung.....	60
4.3.2	Anzeigen von Daten.....	61
4.3.3	Abspeichern von Daten.....	63
4.4	Test Mode.....	64
<b>5</b>	<b>Ergebnis und Anwendungsbeispiele.....</b>	<b>65</b>
5.1	Szenario 1: Durchzug von Wolken.....	66
5.2	Szenario 2: Übertemperaturalarm an SCA 4.....	68
<b>6</b>	<b>Schlussbetrachtung.....</b>	<b>73</b>
6.1	Diskussion.....	73
6.2	Ausblick.....	74
	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>77</b>
	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>81</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>83</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>87</b>
A1	Anlagenschema.....	87



A2	VI-Hierarchie.....	89
A3	Bedienoberfläche <i>Operation Mode</i> .....	90
A4	Bedienoberfläche <i>Test Mode</i> .....	94



# Abkürzungsverzeichnis

CT	Cold Tank
CSP	Concentrated Solar Power
DNI	Direct Normal Irradiance
ECO	Economizer
EMSP	Évora Molten Salt Platform
EVA	Evaporator
HCE	Heat Collecting Element (Receiver Tube)
HMI	Human Machine Interface
HPS	High Performance Solar
HT	Hot Tank
HTF	Heat Transfer Fluid
IAM	Incident Angle Modifier
KKS	Kraftwerk-Kennzeichensystem
PSA	Plataforma Solar de Almería
P&ID	Piping and Instrumentation Diagram
SF	Solar Field
SCA	Solar Collector Assembly
SGS	Steam Generating System
SH	Superheater



# 1 Einleitung

Die Welt benötigt immer mehr Energie [1].

Steigender Wohlstand sowie das beständige Wachstum der Weltbevölkerung führen zu einem stetig ansteigenden Energieverbrauch, weltweit [1]. Aus dem von BP® veröffentlichten „Energy Outlook 2035“ geht hervor, dass für den Zeitraum zwischen 2013 und 2035 mit einem durchschnittlichen Anstieg des weltweiten Energieverbrauchs von 1,3 % pro Jahr zu rechnen ist [2]. Obwohl der überwiegende Teil der weltweit genutzten Energie noch immer aus fossilen Brennstoffen wie Öl, Kohle und Gas stammt, erfreuen sich erneuerbare Energien erheblichen Wachstums [2], was auch die Technologieentwicklung in den Bereichen Solar- und Windenergie durch die Förderung erneuerbarer Energien seit dem Jahre 2008 maßgeblich vorantreibt [3].

Durch den enormen technischen Fortschritt im Bereich konzentrierender Solarsysteme, spielen inzwischen auch solarthermische Kraftwerke eine zentrale Rolle in der solaren Energiegewinnung [4]. Durch eine Steigerung der Wirkungsgrade sowie eine Senkung der Investitionskosten haben diese das Potential, ihren Anteil an der zukünftigen Energiegewinnung maßgeblich zu steigern [4]. Hier hat sich als wichtigster Vertreter der linienfokussierenden Systeme vor allem die Parabolrinnentechnik etabliert, da diese Technologie bereits seit Jahrzehnten kommerziell genutzt wird und daher auf Erfahrungen von bis zu 30 Jahren Betrieb zurückgegriffen werden kann [3].

## 1.1 Solarforschung am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)

Als nationales Forschungszentrum der Bundesrepublik Deutschland mit ca. 8000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern an über 20 Standorten, leistet das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeit in den Bereichen Luftfahrt, Raumfahrt, Energie, Verkehr und Sicherheit [5]. Die Forschungsaktivitäten reichen hierbei von der Grundlagenforschung bis hin zur Entwicklung von neuartigen Produkten und sind in nationale und internationale Kooperationen mit anderen Forschungseinrichtungen sowie der Industrie eingebunden [5]. Das DLR betreibt sowohl für die eigene Forschung, als auch als Dienstleistung für

Kunden und Partner eine Vielzahl von Großforschungsanlagen und ist darüber hinaus von der Bundesregierung für die Planung und Umsetzung deutscher Raumfahrtaktivitäten beauftragt [5]. Zu den Hauptaufgaben des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt gehören nicht nur die Erforschung von Erde und Sonnensystem, sondern auch die Entwicklung nachhaltiger Technologien [5].

Seit Mitte der 70er Jahre ist das DLR in der Energieforschung aktiv und bündelt seit 2011 seine Forschungsaktivitäten im Bereich der konzentrierenden Solartechnologien am Institut für Solarforschung, mit Sitz in Köln, Stuttgart und Jülich sowie im größten europäischen Testzentrum für konzentrierende Solartechnologien, der *Plataforma Solar de Almería* in Spanien [6] [7]. Zur Erzeugung von Strom, Wärme und Brennstoffen richten sich die Kernthemen des Instituts auf die Forschung und Entwicklung von konzentrierenden Solarsystemen [7]. Die Arbeiten der rund 150 Mitarbeiter/-innen des Instituts sind im Wesentlichen auf die Optimierung von Sonnenwärmekraftwerken fokussiert und haben das Ziel, die eingesetzten Kraftwerkskomponenten zu verbessern sowie die Anlagenarchitektur und deren Betrieb zu perfektionieren [8]. Das Institut ist in die Teilbereiche Punktfokussierende Systeme, Linienfokussierende Systeme, Solare Verfahrenstechnik und Qualifizierung unterteilt und gehört mit seinen Arbeiten von der Grundlagenforschung bis hin zum Testbetrieb kompletter Kraftwerke, zu den weltweit führenden Instituten auf dem Gebiet der Solarkraftwerke [7] [8].

## 1.2 Motivation

Solarthermische Parabolrinnenkraftwerke stellen die bisher kommerziell erfolgreichste Technologie von Sonnenwärmekraftwerken dar [3]. Das zentrale Element dieser Kraftwerke bilden rinnenförmige Konzentratorspiegel (siehe Abbildung 1).

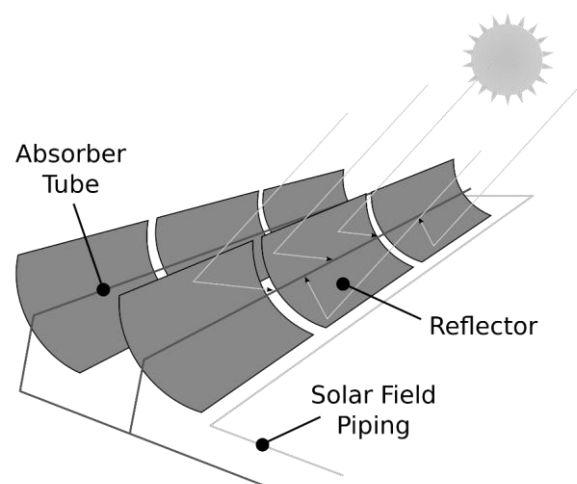


Abbildung 1: Schematische Darstellung von Parabolrinnen-Kollektoren [9].

Als Wärmeträgermedium, welches das Absorberrohr dieser Kollektoren durchströmt, wird, sowohl bei bereits in Betrieb genommenen Anlagen, als auch bei vielen sich in der Planung befindenden solarthermischen Kraftwerken, Thermoöl verwendet [10]. Dessen maximale Arbeitstemperatur liegt mit ca. 395°C [10] weit unter dem Temperaturpotential von Kollektorfeld und Dampfturbinenkraftwerk und stellt somit einen limitierenden Faktor für die obere Prozesstemperatur des Kraftwerks dar. Um hier eine Erhöhung der Betriebstemperatur erreichen zu können und somit den Wirkungsgrad von Kraftwerksblock und Anlage zu steigern, forscht das Institut für Solarforschung an den Möglichkeiten der Verwendung von geschmolzenem Salz als Wärmeträgermedium [3].

Trotz zahlreicher, vielversprechender Studien über einen Zeitraum von inzwischen mehr als 10 Jahren, wurde die Verwendung von Salzschnelze als Wärmeträgerflüssigkeit bisher nur einmalig in einer kleineren Anlagengröße (5 MW) umgesetzt [11]. Grund dafür sind eine Vielzahl technischer Herausforderungen und Bedenken, welche der Betrieb von Parabolrinnenkraftwerken mit flüssigem Salz mit sich bringt [10]. Beispielhaft ist hier der hohe Erstarrungspunkt von Salz zu nennen, der je nach Salzzusammensetzung zwischen 120°C und 220°C [12] liegen kann. Weitere relevante Fragestellungen liegen unter anderem in der Beanspruchung der Kraftwerkskomponenten durch Temperatur und Korrosion und den daraus resultierenden Anforderungen an das einzusetzende Material [13].

Um die sich im Laufe der Zeit etablierten zehn „Hauptbedenken“ [13] bezüglich der Verwendung von flüssigem Salz in Parabolrinnenkraftwerken zu widerlegen, trägt das DLR im Rahmen des Verbundprojekts „High Performance Solar 2 (HPS2)<sup>1</sup>“ maßgeblich an der Errichtung einer – bis auf die Dampfturbine vollständigen – Demonstrationsanlage mit dem Namen „Évora Molten Salt Plattform (EMSP)“ bei [14]. Die Anlage befindet sich im portugiesischen Évora und soll Ende 2017 in Betrieb genommen werden [15]. Eine Demonstration der Technologie in diesem Maßstab bietet die Möglichkeit, alle Betriebskonzepte einer Anlage kommerzieller Größe realistisch abzubilden und damit auch den Umgang mit Flüssigsalssystemen und den Betrieb einer solchen Anlage weiter zu entwickeln [13].

Die Leitung des Kraftwerks wird durch eine elfköpfige Betriebsmannschaft erfolgen, welche die Anlage in drei Schichten á acht Stunden steuert [16].

Da bisher keine Erfahrungen im Betrieb von Kraftwerken mit Salzschnelze vorhanden sind, muss das Betriebspersonal im Rahmen einer speziell konzipierten Schulung auf diese

---

<sup>1</sup> „High Performance Solar 2 – Demonstration einer solarthermischen Parabolrinnenanlage und Dampferzeugersystem basierend auf Flüssigsalz als Wärmeträgermedium (HPS2)“

Aufgabe vorbereitet werden. Hier ist vor allem der Gefahr des Erstarrens des Salzes in der Anlage vorzubeugen. Zur Unterstützung dieser Schulung soll ein Simulator bereitstehen, anhand diesem die Ingenieure und Techniker, welche bisher wenig Erfahrung mit Solarthermie und speziell der Verwendung von flüssigem Salz haben, das Verhalten der Pilotanlage kennen lernen können. Der Fokus liegt hierbei auf dem Solarfeld- und Speichersystem des Kraftwerks.

Ziel des Trainings mit Hilfe des Simulators ist es, dem Benutzer ein prinzipielles Verständnis über das Verhalten des Solarfeldes zu vermitteln, wobei ein besonderes Augenmerk auf dem transienten Verhalten des Solarfeldes, zum Beispiel während einer Abschattungsphase, liegt. Darüber hinaus soll durch den Simulator die Möglichkeit bestehen, die Betriebsmodi der Anlage kennenzulernen und einen groben Eindruck von der Struktur der Leittechnik der realen Anlage zu erhalten.

### 1.3 Zielsetzung

Im Rahmen dieser Arbeit soll eine Simulationssoftware für das Solarfeld- und Speichersystem der Évora-Pilotanlage entwickelt werden, welche zur Schulung des Betriebspersonals sowie für die Planung des Testbetriebs der Pilotanlage genutzt werden kann. Diese mit LabVIEW® zu erstellende Software soll aus einem hinterlegten Simulationsmodell, welches das physikalische Verhalten der Anlage abbildet, sowie einem Leitsystem, welches die Anlage regelt und steuert, bestehen und dem Benutzer über eine der realen Leitwarte nachempfundenen Bedienkonsole das Steuern der Anlage ermöglichen. Die Leittechnik sowie das zugehörige HMI des Simulators sollen sich zwar an der von SIEMENS® zu realisierenden Steuerungstechnik orientieren, jedoch soll der Simulator keine exakte Kopie des späteren Leitsystems darstellen.

Die Arbeit fokussiert sich auf das Solarfeld- und Speichersystem der Anlage und ist auf die Abbildung essenzieller Anlagenkomponenten und Funktionen dieses Anlagenteils beschränkt.

Für die Umsetzung der zugehörigen Leittechnik ist eine vorläufige Funktionsbeschreibung (*Functional Description*) der realen Anlage vorhanden. Diese *Functional Description* besteht aus drei Dokumenten [17] [18] [19], aus welchen im Rahmen dieser Arbeit nach Möglichkeit bereits erste Steuerungskonzepte in den Simulator übernommen werden sollen. Die Intention liegt darin, dem späteren Benutzer eine Simulation bestimmter Szenarien, wie zum Beispiel den Durchzug von Wolken über das Solarfeld, zu ermöglichen.



Um eine detailgetreue Simulation des Solarfeldes zu gewährleisten soll das bereits existierende und am DLR entwickelte Kollektorfeldmodell „Virtual Solar Field (VSF)“ in die Simulationssoftware integriert werden. Dieses Simulationstool basiert auf C/C++ und besitzt bereits eine für diese Arbeit vorgefertigte Kommunikationsschnittstelle zu LabVIEW®.

Die Entwicklung des Simulators beruht auf einer agilen Arbeitsweise nach Scrum-ähnlichen Methoden<sup>2</sup> mit fest definierten Produktinkrementen, welche sich nach einem umzusetzenden *Product Backlog* [20] richten.

---

<sup>2</sup> Für weitere Informationen siehe *The Scrum Guide™* [38].



## 2 Grundlagen der Arbeit

In diesem Kapitel wird mit einer thematischen Einführung in solarthermische Parabolrinnenkraftwerke sowie der Beschreibung des zu integrierenden Solarfeldmodells Virtual Solar Field ein Überblick über die für den Simulator relevanten Grundlagen und die Ausgangssituation der Arbeit gegeben.

Das erste Unterkapitel umreißt die Funktionsweise und den Aufbau von mit Salzschnmelze betriebenen solarthermischen Parabolrinnenkraftwerken. Daraufhin wird die zu simulierende Pilotanlage in Évora näher beschrieben. Abschließend wird das zugrundeliegende Simulationsmodell Virtual Solar Field inklusive der für den Simulator in Vorarbeiten entwickelten Kommunikationsschnittstelle vorgestellt.

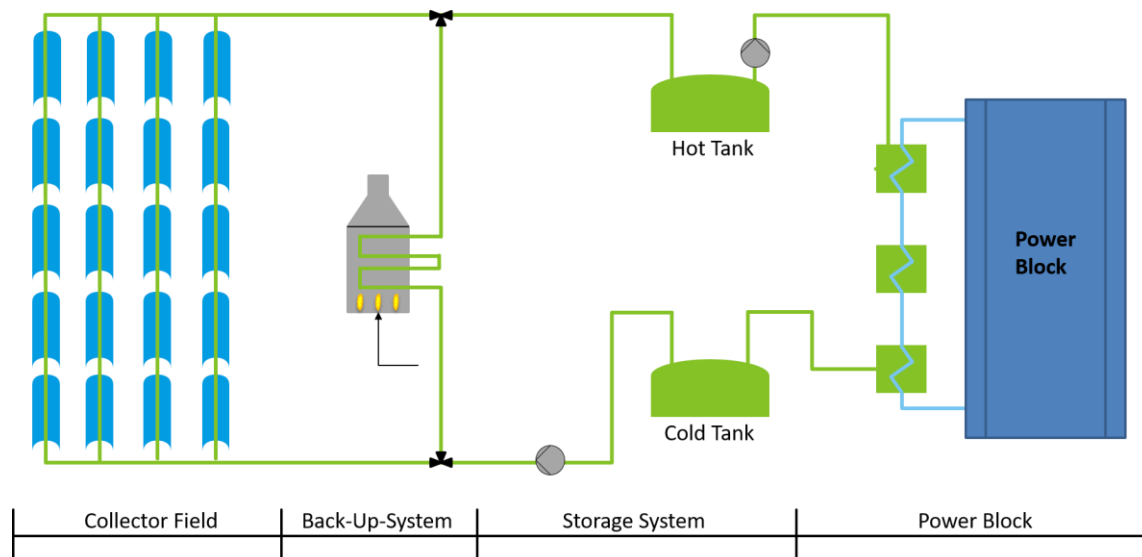
### 2.1 Solarthermische Parabolrinnenkraftwerke

Die Parabolrinnentechnik hat sich unter den Sonnenwärmekraftwerken weltweit etabliert und wird bereits in kommerziell betriebenen Kraftwerken eingesetzt [4].

Die Andasol-Kraftwerke in Spanien sind mit einer Leistung von 3 mal 50 Megawatt die derzeit größten solarthermischen Parabolrinnenkraftwerke Europas und versorgen bereits rund 500.000 Menschen mit sauberem Strom [21]. Des Weiteren besitzen diese Anlagen thermische Speichermöglichkeiten, welche bei inaktivem Solarfeld einen Vollastbetrieb der Turbine von bis zu acht Stunden gewährleisten [21]. Diese integrierten Salzspeicher stellen einen der herausragendsten Vorteile solarthermischer Kraftwerke dar.

Da sich diese Arbeit auf Anlagen mit Salzschnmelze als Wärmeträgermedium bezieht, wird im Folgenden speziell auf diese Technologie eingegangen. Viele Konzepte gelten jedoch auch für mit Thermoöl arbeitende Parabolrinnenkraftwerke, wie zum Beispiel die Verwendung von flüssigem Salz als Speichermedium.

Abbildung 2 stellt den Aufbau eines Kraftwerks mit Flüssigsalz als Wärmeträger- und Speichermedium dar.



**Abbildung 2: Aufbau eines mit Salzschnelze arbeitenden, solarthermischen Parabolrinnenkraftwerks (nach [10]).**

Auf das Kollektorfeld einfallende Sonnenstrahlen werden mithilfe von – der Sonne in der Regel einachsrig nachgeführten – Reflektoren auf ein in der Fokallinie angebrachtes Absorberrohr gebündelt (siehe Abbildung 1). Dieses Absorberrohr (auch Receiver genannt) wird von einem Wärmeträgerfluid (engl. Heat Transfer Fluid = HTF) durchströmt, welches die aufgenommene Wärme der vorgesehenen Anwendung (z.B. Kraftwerksblock, Wärmespeicher etc.) zuführt [10]. Wie auch bei konventionellen Kraftwerken wird die gewonnene Energie durch einen Wärmeübertrager genutzt, um eine Dampfturbine zu betreiben und mit einem angekoppelten Generator Strom zu erzeugen. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, heißes Salz in thermischen Speichern zwischen zu speichern, um im Falle von Strahlungseinbrüchen den Betrieb des Kraftwerksblocks fortführen zu können.

Ein solarthermisches Parabolrinnenkraftwerk kann in fünf wesentliche Teilsysteme untergliedert werden:

- das Solarfeld, welches mit Hilfe der Sonnenenergie das Wärmeträgermedium erhitzt,
- ein Speichersystem, mit dem Zweck Energie in Form von Wärme zu speichern und somit auch einen Betrieb der Turbine ohne solare Einstrahlung (z.B. beim Durchzug von Wolken oder über Nacht) zu ermöglichen,
- der eigentliche Kraftwerksblock, welcher mit Hilfe des vorgelagerten Dampferzeugers und den Komponenten Dampfturbine und Generator für die Erzeugung von Strom verantwortlich ist,

- sowie ein zusätzliches Back-Up-System, welches ein Einfrieren des Salzes im Falle knapper Heißsalz-Ressourcen verhindert.

Ein bedeutendes Merkmal bei der Benutzung von flüssigem Salz als Speicher- und Wärmeträgermedium ist, dass über die beiden Speichertanks eine strikte Entkopplung zwischen Solarfeld und Kraftwerksblock stattfindet, was eine Kompensation kurzzeitiger Strahlungseinbrüche problemlos ermöglicht [10].

## 2.2 Versuchsanlage Évora Molten Salt Platform

Bereits im Jahre 2010 wurde im Rahmen des Vorgängerprojektes von HPS2 mit dem Bau der Demonstrationsanlage in Portugal begonnen. Nach dem Ausstieg eines großen Industriepartners aus dem Solargeschäft und somit auch aus dem HPS(1)-Projekt im Jahr 2012, wurde die sich bereits in Bau befindliche Anlage von einem der Kooperationspartner des DLRs – der Universität von Évora – übernommen. Das fortwährende Ziel ist die Vervollständigung der Anlage und deren Nutzung zur Demonstration der Technologie [16].

Der seit dem Jahre 2012 großteils unveränderte Stand der Arbeit ist in Abbildung 3 dargestellt.

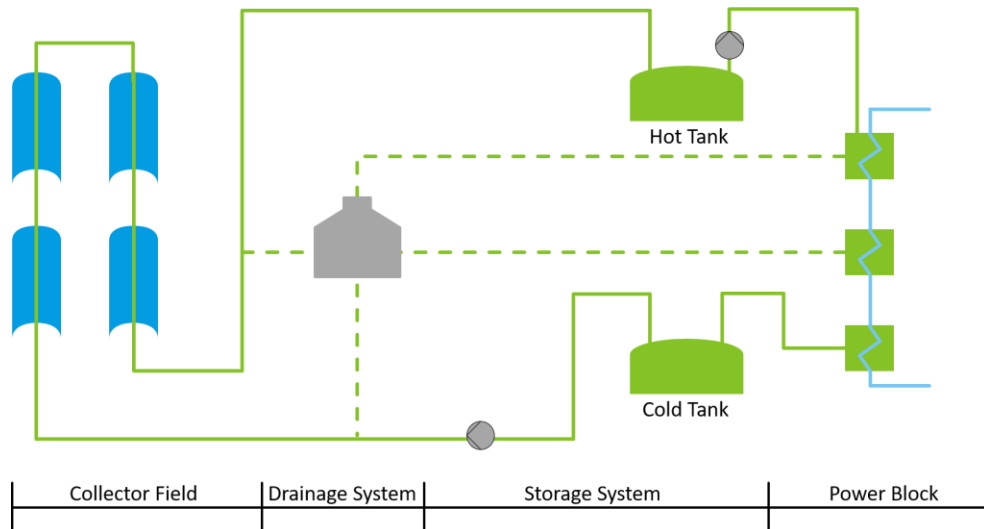


Abbildung 3: Stand EMSP (2012) [16].

Das Konzept der Anlage entspricht im Grundsatz dem eines konventionellen, mit flüssigem Salz betriebenen Parabolrinnenkraftwerks mit dem wesentlichen Unterschied, dass aufgrund einer fehlenden Turbine keine Stromerzeugung stattfindet [14]. Darüber hinaus wird ein Einfrieren des Salzes während des „Anti-Freeze-Modes“ nicht durch den Einsatz eines zusätzlichen Befeuerungssystems, sondern durch die Verwendung von sogenannten Begleitheizungen realisiert [16]. Eine weitere grundlegende Neuerung ist der Einsatz eines sogenannten Drainagetanks. Dieser soll eine Entleerung des vollständigen

Systems (Solarfeld, Rohrleitungen, Dampferzeuger) ermöglichen [14]. Des Weiteren gehört zu dessen Funktionsbereich auch das Aufschmelzen des Salzes mit Hilfe einer integrierten Begleitheizung, um ein anschließendes Befüllen der Teil- bzw. Gesamtanlage zu ermöglichen [14].

Das Grundkonzept der Anlage lässt sich damit folgendermaßen skizzieren:



**Abbildung 4: Grundkonzept Aufbau EMSP (nach [10], [16]).**

Die Anlage ist auf eine Temperatur von  $565^{\circ}\text{C}$  und einen Druck von 20 bar ausgelegt. Sämtliche Rohrleitungen bestehen aus Edelstahl und können über Kabelheizungen erhitzt werden. Zum Schutz der Systemkomponenten im Falle eines Stromausfalls, besitzt die Anlage einen Dieselgenerator (400 kVA) sowie ein Batteriesystem mit einer Leistung von bis zu 5 kVA. Für die Leittechnik wird das von SIEMENS® entwickelte kommerzielle Leitsystem *SPPA-T3000* eingesetzt. Zusätzlich werden durch das DLR zwei Meteostationen und fünf Wolkenkameras für aktuelle Strahlungsmessungen und -vorhersagen installiert [16]. Des Weiteren besitzt die Anlage eine Reihe diverser Pumpen und Ventile zur Steuerung des Massenstroms sowie zahlreiche Messstellen für eine möglichst umfangreiche Analyse des Anlagenverhaltens (Details siehe [22]).

Im Folgenden werden die wesentlichen Designspezifikationen der Grundkomponenten aufgeführt.

### Solarfeld

Das Kollektorfeld ist auf eine thermische Leistung von 2,7 MW ausgelegt und besteht aus einer 720 m langen Kollektorreihe, basierend auf vier Kollektorsystemen (SCAs) á 171 m Länge. Die Aperturweite eines einzelnen Kollektorelements (HCEs) beträgt 6,77 m. Auch das Solarfeld kann extern beheizt werden. Die Receiverrohre der Kollektoren sind hierfür

mit Impedanzheizungen, die Verbindungsleitungen mit Kabelheizungen ausgestattet. Im Normalbetrieb ist für das Kollektorfeld eine Eingangstemperatur von 290°C und eine Ausgangstemperatur von 500°C vorgesehen. [16] [23] [22]

### **Speichersystem**

Das Speichersystem der Anlage wird durch ein Flüssigsalz-Zweitanksystem realisiert, welches eine Kapazität von bis zu 6 MWh besitzt, was einem Vollastbetrieb der Anlage von bis zu zwei Stunden entspricht (bei  $\Delta T=280$  K). Die Tanks besitzen eine Höhe von 5 m, einen Durchmesser von 3,1 m und haben somit ein Volumen von je 37,7 m<sup>3</sup>, was je nach Dichte (Salz- und Temperaturabhängig) einer Masse von ungefähr 72 t entspricht. [13] [16] [23]

### **Drainagetank**

Der Drainagetank hat eine Höhe von 5,1 m und einen Durchmesser von 1,8 m. Damit fasst er ein Volumen von 16,6 m<sup>3</sup>, was eine vollständige Entleerung des Solarfeldes, des Dampferzeugersystems und der Rohrleitungen ermöglicht [24].

### **Dampferzeugersystem**

Das Dampferzeugersystem besteht aus den drei Wärmeübertragern Vorwärmer/Verdampfer, Überhitzer 1 und Überhitzer 2. Für die Dampferzeugung werden Bensson-Kessel eingesetzt. Das System liefert eine maximale Leistung von 1,6 MW und ist auf Dampftemperaturen von bis zu 560°C und einen Dampfdruck von bis zu 140 bar ausgelegt. Aufgrund der fehlenden Turbine wird über entsprechende Ventile für eine Entspannung des erzeugten Wasserdampfs gesorgt. [16]

## **2.3 Simulationsmodell Virtual Solar Field**

Das Virtual Solar Field (VSF) ist ein vom DLR entwickeltes Simulationsmodell, welches in der Lage ist, ein komplettes Solarfeld detailgetreu abzubilden und speziell für die Analyse von Übergangszuständen<sup>3</sup> im Feld entwickelt wurde [25]. Abhängig von zeit- und ortsabhängigen Eingangsparametern, bildet das Tool den Fluss eines einphasigen Wärmeträgerfluids mit Startpunkt Kraftwerksblock, über Headerleitungen und Kollektorfeld hinweg, bis zurück zum Kraftwerksblock ab [25]. Als Ergebnis liefert das Tool die Oberflächentemperaturen der Komponenten sowie die Temperaturen und

---

<sup>3</sup> Übergangszustände treten zum Beispiel beim Systemstart, beim Durchzug von Wolken oder dem Wechsel des Betriebsmodus der Anlage ein [21].

Strömungsgeschwindigkeiten des Wärmeträgermediums an sämtlichen Orten des Solarfeldes [26]. Abbildung 5 stellt das Simulationskonzept von VSF in vereinfachter Weise dar.

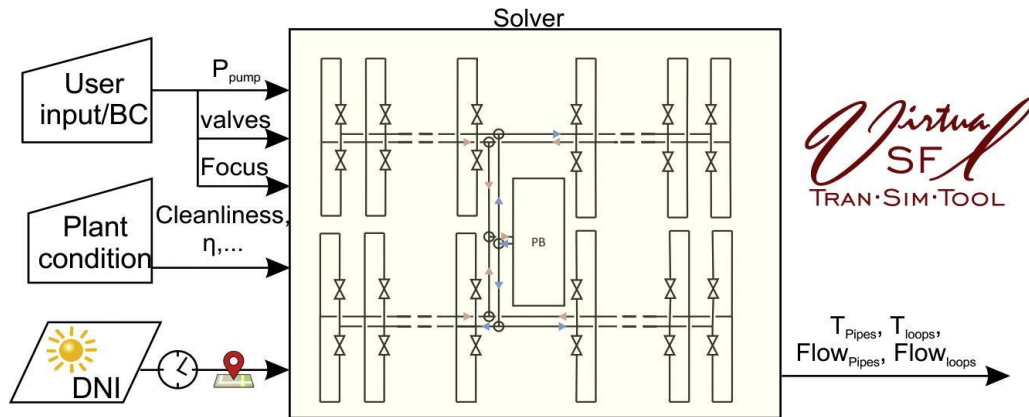


Abbildung 5: Vereinfachtes Schema des Simulationstools VSF [27].

Das VSF-Modell ermöglicht es dem Benutzer, das Verhalten des Solarfeldes sowohl im stationären Betrieb, als auch im Fall von Übergangszuständen detailgetreu, mit einer Berechnungsgeschwindigkeit von bis zu 100-facher Echtzeit, nachzubilden [25]. Hierbei werden sämtliche spezifischen Verhaltensweisen und Umgebungsparameter, wie zum Beispiel eine inhomogene Einstrahlungsverteilung auf die Solarfeldfläche, berücksichtigt [26]. Darüber hinaus gewährleistet das Modell eine Variation der Parametrierung von Regelalgorithmen und ermöglicht die Nachbildung des Solarfeldverhaltens auf Basis von vorgebbaren, räumlich diskretisierten Strahlungsvorhersagen [28].

Die Varietät der Funktionen prädestiniert VSF für eine Vielzahl von Anwendungen, wie zum Beispiel die Entwicklung von Regelalgorithmen zur Solarfeld- und Kraftwerkssteuerung [25]. Auch ein Einsatz des Tools bereits in der Planungsphase solarthermischer Kraftwerke ist vorstellbar, um zum Beispiel den Betrieb diverser Solarfeldkomponenten zu simulieren oder das Verhalten des Solarfeldes unter Grenzbedingungen zu testen [25].

Das Simulationstool wurde vollständig in der Programmiersprache C++ entwickelt und bildet seine Ergebnisse in ASCII- oder MATLAB®-Dateien ab [26].

### 2.3.1 Individualisiertes VSF-Modell für Testanlage

Um VSF als Modell für das Kollektorfeld im Trainingssimulator integrieren zu können, wurde im Rahmen der Vorbereitung auf diese Arbeit eine VSF-Version erstellt, welche



auf die Pilotanlage in Évora konfiguriert ist und eine Kommunikationsschnittstelle für die entsprechenden Eingangsparameter und Ausgangswerte enthält.<sup>4</sup>

Abbildung 6 stellt den durch diese Version umgesetzten Teil des Kraftwerks mit sämtlichen Komponenten und relevanten Messstellen sowie den daraus resultierenden Ein- und Ausgangswerten des Modells dar (Details siehe Tabelle 2 und Tabelle 3 in Kapitel 3.3.2 ).

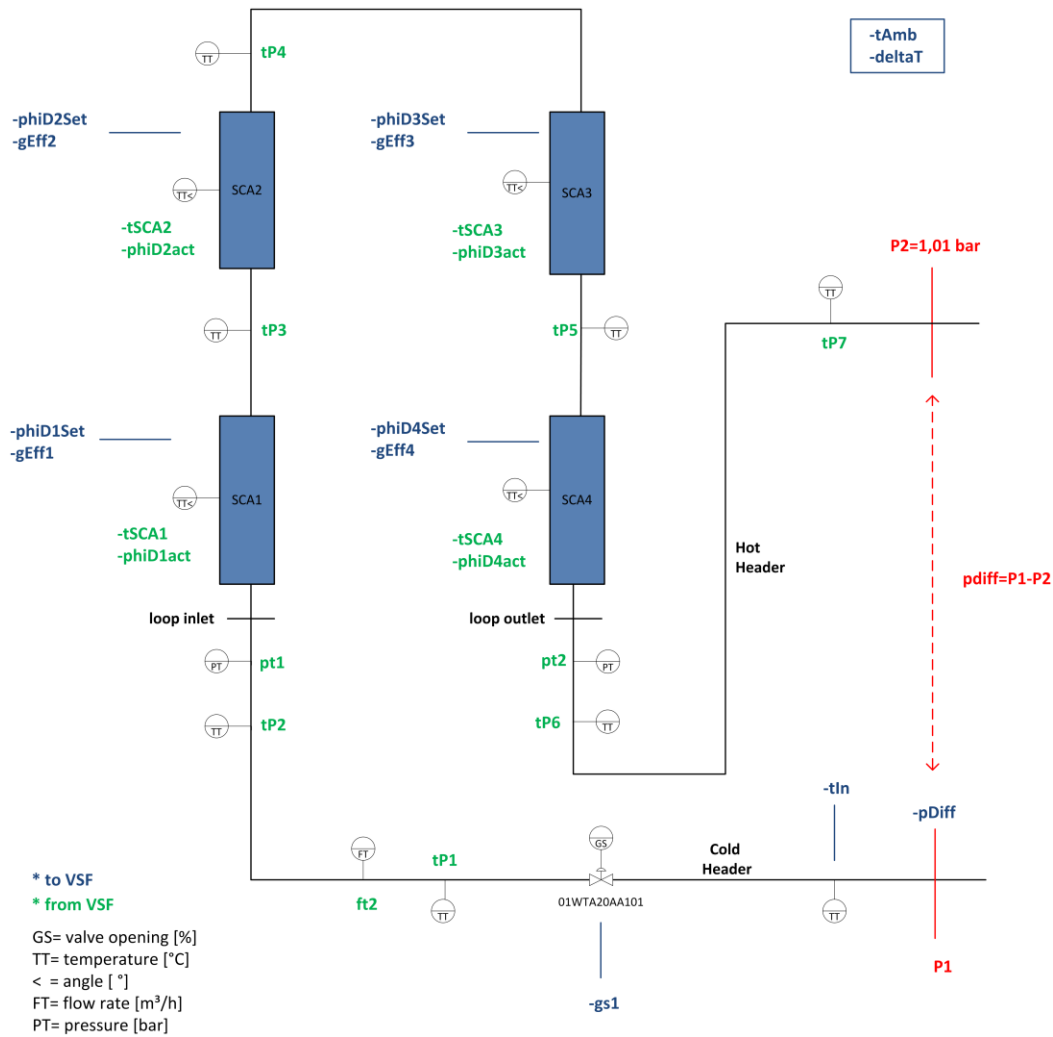


Abbildung 6: In VSF realisierter Teil der Évora Molten Salt Platform.

Das Modell enthält die vom Kalttank abgehende „kalte“ Headerleitung samt geregelterm Ventil zur Anpassung des Eingangsmassenstroms, den Kollektorloop bestehend aus vier SCAs, sowie die „heiße“ Headerleitung, welche am heißen Salzspeichertank endet.

Um eine Kopplung dieses Teilsystems an das Gesamtsystem zu gewährleisten, besitzt das Modell am Ende der heißen Headerleitung den auf 1,01 bar definierten Absolutdruck  $P2$ .

<sup>4</sup> Jede weitere Nennung von Virtual Solar Field (VSF) in dieser Arbeit bezieht sich auf diese speziell zugeschnittene Version.

Dieser festgesetzte Leitungsdruck bildet in Kombination mit dem variablen Eingangsdruck  $P1$  [pascal], die Druckdifferenz  $pdiff$  [pascal]. Dieser Wert stellt zusammen mit der Ventilöffnung  $gs1$  [%], einen der elementarsten Eingangsparameter für das Solarfeldmodell dar. Die Vorgabe dieser Werte definiert das über das Kollektorfeld anliegende Druckpotential und dient somit als Grundlage für die Massenstromberechnung des Tools VSF. Wie auch diese beiden Parameter, sind alle Eingangsparameter des Modells in Abbildung 6 mit blauer Schrift dargestellt und sollen im folgenden Abschnitt näher beschrieben werden.

Zusätzlich zum Eingangs-Leitungsdruck befindet sich auch der Parameter  $tIn$  am Startpunkt der kalten Headerleitung.  $tIn$  bezeichnet die Eingangstemperatur des Solarfeldmodells in Grad Celsius und repräsentiert die Temperatur der Salzschnmelze am Ausgang des kalten Wärmespeichers. Der zweite Eingangs-Temperaturparameter ist die Umgebungstemperatur  $tAmb$  [°C]. Dieser Wert ist für die Berücksichtigung von Wärmeverlusten in Kollektoren und Rohrleitungen von Nöten. Die Modellierung der Kollektoren erfordert zudem die Werte der gegenwärtigen effektiven Einstrahlung auf die entsprechenden Kollektoren sowie den Stellwinkel des jeweiligen SCAs. Die effektiven Einstrahlungswerte  $geff1$  bis  $geff4$  [Watt/m<sup>2</sup>] beschreiben die Energie der auf die Kollektoren SCA 1 bis SCA 4 einfallenden Sonnenstrahlung. Diese, in der üblichen Nomenklatur mit  $G_{eff}$  bezeichneten Werte, lassen sich anhand folgender Formel ermitteln:

$$G_{eff} = DNI \cdot \cos(\theta_i) \cdot IAM(\theta_i)^5 \quad , \text{ nach [29] mit}$$

$DNI$ : Einstrahlung [Watt/m<sup>2</sup>]

$\theta_i$ : Einstrahlungswinkel [°]

$IAM(\theta_i)$ : Einstrahlungsfaktor als Funktion des Einstrahlungswinkels  $\theta_i$

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden die vom Einstrahlungswinkel abhängigen Funktionen  $\cos(\theta_i)$  und  $IAM(\theta_i)$  als Faktor  $f_{geff}(\theta_i)$  zusammengefasst.

Der Stellwinkel  $\Phi_D$  [°] des jeweiligen SCAs (im Modell mit  $phiD1Set$  bis  $phiD4Set$  bezeichnet), bezieht sich auf die Ausrichtung der Kollektoröffnung zur Sonne und gibt die Winkelabweichung der Kollektoren zum optimalen Track-Winkel an (siehe folgende Skizze).

---

<sup>5</sup> Für weitere Informationen siehe [28].

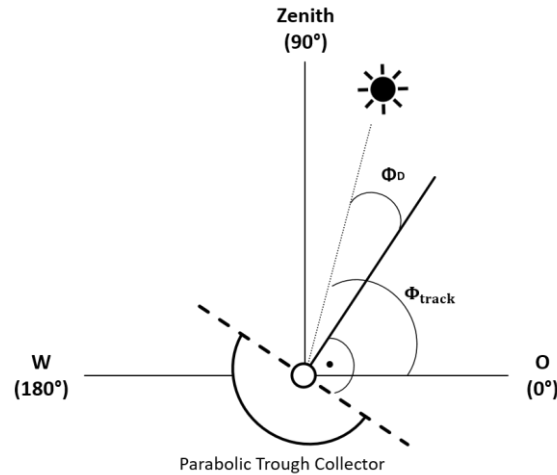


Abbildung 7: Skizze des Track- und Stellwinkels eines Kollektors (nach [29]).

Auf Basis dieser Fokussierabweichung lässt sich der Energieeintrag eines Kollektors, anhand der durch die Ausrichtung der Parabolrinne definierten Energieaufnahme, steuern (siehe Kapitel 4.1.1).

Da sämtliche Ein- und Ausgangswerte des Modells zeitabhängige Größen sind, wird dem Modell zusätzlich der Zeitfaktor  $\Delta T$  [s] übergeben. Dieser Zeitfaktor gibt an, für welche Zeitspanne VSF die nachfolgende Berechnung durchzuführen hat. Somit sind für diesen Zeitraum die Eingangsparameter konstant.

Auch die Ausgangsvariablen des Modells sind in Abbildung 6 dargestellt (grün). Diese basieren auf einem Teil der Messstellen der realen Anlage, welche mit den Messstellen der später im Simulator umzusetzenden Anlage übereinstimmen sollen. Virtual Solar Field liefert als Simulationsergebnis für den durch  $\Delta T$  vorgegebenen Zeitraum sowohl die Temperaturen  $t_{SCA1}-t_{SCA4}$  [°C] der Kollektoren (im Bereich Kollektormitte), als auch die Temperaturen  $t_{P1}-t_{P7}$  [°C] des HTFs an den vordefinierten Messstellen zurück. Darüber hinaus werden die aktuellen Stellwinkel  $\phi_{D1Act}-\phi_{D4Act}$  [°] der Kollektoren ermittelt. Diese Winkel können, aufgrund einer von den Servomotoren benötigten Zeit für das Ausrichten der Parabolrinnen, von den Sollwinkeln  $\phi_{D1set}-\phi_{D4set}$  abweichen. In Bezug auf den resultierenden Massenstrom des Solarfeldes, berechnet VSF den Volumenstrom  $\dot{V}_2$  [m³/s] sowie die absoluten Druckwerte  $p_{t1}$  [pascal] (Kollektorfeld-Eingang) und  $p_{t2}$  [pascal] (Kollektorfeld-Ausgang). Zur Validierung der Zeitsynchronisation des Modells mit entsprechenden anderen Modellen, wird ein Zeitparameter  $timeElapsed$  [s] überliefert, welcher den Wert für den bis zu diesem Zeitpunkt im Modell simulierten Zeitraum enthält.

Die genaue Spezifikation der Parameter in Bezug auf Datentyp und Wertebereich findet in Kapitel 3.3.2 dieser Arbeit statt.

### 2.3.2 Kommunikationsschnittstelle zu LabVIEW®

Um einen Datenaustausch mit dem späteren Trainingssimulator gewährleisten zu können, wurde im Rahmen der Vorarbeiten dieser Arbeit eine Kommunikationsschnittstelle zwischen dem individualisierten VSF-Modell und einem in LabVIEW® erstellten Kommunikationsmodul entwickelt.

Diese Schnittstelle basiert auf dem TCP-/IP-Kommunikationsprotokoll, wobei VSF als TCP-/IP-Server fungiert und die LabVIEW®-Kommunikationseinheit das Gegenstück – den TCP-/IP-Client – darstellt.

Ein Kommunikationszyklus zwischen VSF und dem Kommunikationsmodul des späteren Simulators erfolgt nach dem in Abbildung 8 dargestellten Schema.

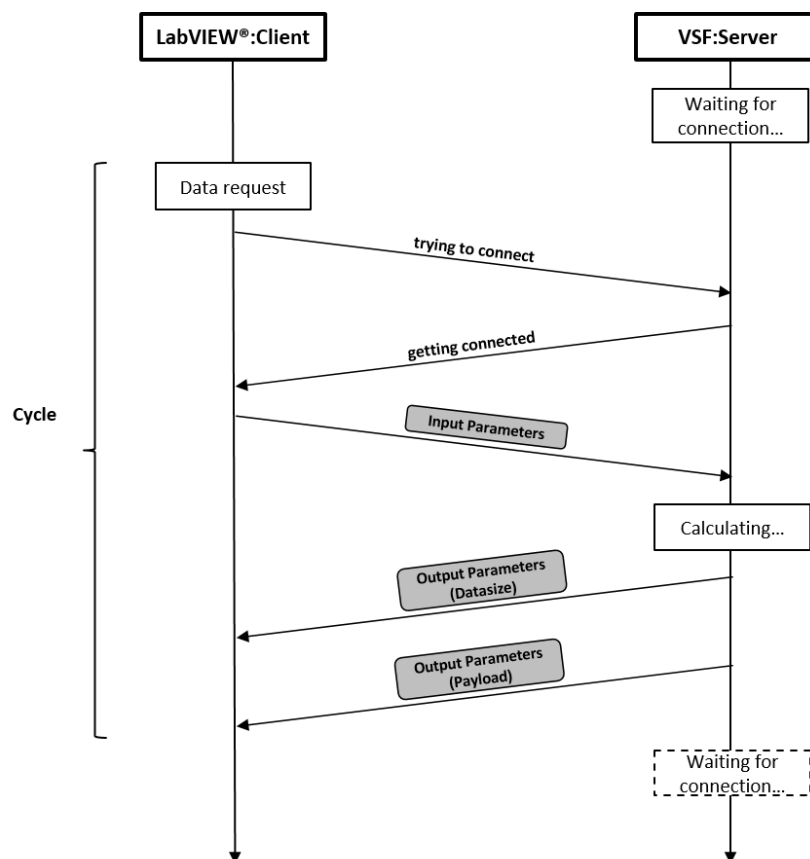


Abbildung 8: Kommunikationsstruktur von VSF und dem späteren Simulator.

Der zeitliche Ablauf sowie die Synchronisation des Datenaustausches zwischen den beiden Komponenten wird in Kapitel 3.3.1 näher betrachtet.

Im Folgenden wird der Aufbau der in Abbildung 8 in grau dargestellten Datenpakete beschrieben.

### Input parameter

Das von LabVIEW<sup>®</sup> versendete Datenpaket enthält als Header die Größe der nach dem Doppelpunkt folgenden Nutzdaten in Bytes (Eingangsparameter) und besitzt folgende Struktur:<sup>6</sup>

*number-of-bytes: \_\_parameter name\_\_value\_\_, \_\_parameter name\_\_value\_\_,...*

Daraus ergibt sich folgender Nachrichtenaufbau:<sup>7</sup>

*datasize: deltaTime [s] , tIn [°C] , gEff1 [Watt/m<sup>2</sup>] , gEff2 [Watt/m<sup>2</sup>] , gEff3 [Watt/m<sup>2</sup>] , gEff4 [Watt/m<sup>2</sup>] , pDiff [pascal] , gS1 [%] , phiD1Set [°] , phiD2Set [°] , phiD3Set [°] , phiD4Set [°] , tAmb [°C]*

### Output parameter (Datasize)

VSF sendet als erstes Datenpaket die Größe des nachfolgenden Datenpakets in Bytes:

*datasize*

### Output parameter (Payload)

Das zweite von VSF gesendete Datenpaket enthält als Nutzdaten die Ergebnisparameter des aktuellen Berechnungszykluses:<sup>6</sup>

*\_\_parameter name\_\_value\_\_, \_\_parameter name\_\_value\_\_,...*

Der Aufbau dieser Nachricht sieht damit folgendermaßen aus:<sup>7</sup>

*timeElapsed [s] , tSCA1 [°C] , tSCA2 [°C] , tSCA3 [°C] , tSCA4 [°C] , tP1 [°C] , tP2 [°C] , tP3 [°C] , tP4 [°C] , tP5 [°C] , tP6 [°C] , tP7 [°C] , ft2 [m<sup>3</sup>/s] , pt1 [pascal] , pt2 [pascal] , phiD1Act [°] , phiD2Act [°] , phiD3Act [°] , phiD4Act [°]*<sup>7</sup>

---

<sup>6</sup> „\_\_“ soll hierbei einen Tabulator darstellen.

<sup>7</sup> [Einheit] repräsentiert an dieser Stelle einen Platzhalter für den zu übermittelnden Wert und gibt die Einheit des zu übermittelnden Wertes an.



## 3 Konzeption des Simulators

In diesem Kapitel soll das Software-Konzept des Simulators entwickelt werden. Dieses basiert auf der *Functional Description* [17] [18] [19], den Grundlagen aus Kapitel 2 sowie den Anforderungen des DLR, welche vorab in einem *Product Backlog* [20]<sup>8</sup> definiert wurden. Darüber hinaus orientiert sich der Simulator an vorliegenden Dokumenten und Informationen<sup>8</sup> zu der sich im Entwicklungsstadium befindenden realen Leitwarte von SIEMENS®. Zu Beginn dieses Kapitels wird das umzusetzende Anlagenmodell betrachtet. Daraufhin werden die daraus hervorgehenden Anforderungen an die Software beschrieben. Dabei werden neben funktionalen Anforderungen auch allgemeine Rahmenbedingungen definiert, welche der Simulator erfüllen soll. Abschließend wird in Unterkapitel 3.3 eine Übersicht über die aus den vorhergehenden Kapiteln resultierenden, grundlegenden Designentscheidungen gegeben.

### 3.1 Zu realisierendes Anlagenmodell

In der in dieser Arbeit entstehenden ersten Version des Simulators liegt der Schwerpunkt auf dem Solarfeld- und Speichersystem des Kraftwerks. Hierfür wird das umzusetzende Anlagenmodell auf die Komponenten der realen Anlage beschränkt, welche für die Simulation des Solarfeldes- sowie des Speichersystems zwingend erforderlich sind. Diese sind nachfolgend aufgelistet:

- Kollektoren
- Speichertanks
- Rohrleitungen
- Ventile
- Pumpen
- (Drainagetank)
- (Dampferzeuger)

Hierbei ist anzumerken, dass der Drainagetank zwar im System abgebildet werden soll, in der ersten Entwicklungsphase des Simulators aber ohne Funktion bleibt. Auch der

---

<sup>8</sup> Aus Vertraulichkeitsgründen sind detaillierte Informationen hierzu nicht in der Arbeit enthalten.

Dampferzeuger soll kein Teil dieser Arbeit sein. Dieser spielt aber für die Temperatur- und Massenstrombilanz des Speichersystems eine zentrale Rolle, weshalb auch dieser im Simulator abgebildet wird und fiktive Ein- und Ausgangsparameter erhält. Auch die zu diesen beiden Komponenten zugehörigen Ventile und Pumpen bleiben damit vorerst funktionslos. Sämtliche genannten inaktiven Komponenten des Simulators werden in dem in Abbildung 10 dargestellten Anlagenschema in grau dargestellt (für Großformat siehe Anhang A1). Die eingezeichneten Messstellen bilden dabei den für den Simulator relevanten Teil der Messstellen der realen Anlage ab und sind mit ihrer KKS-Nummer gekennzeichnet (siehe [22]).



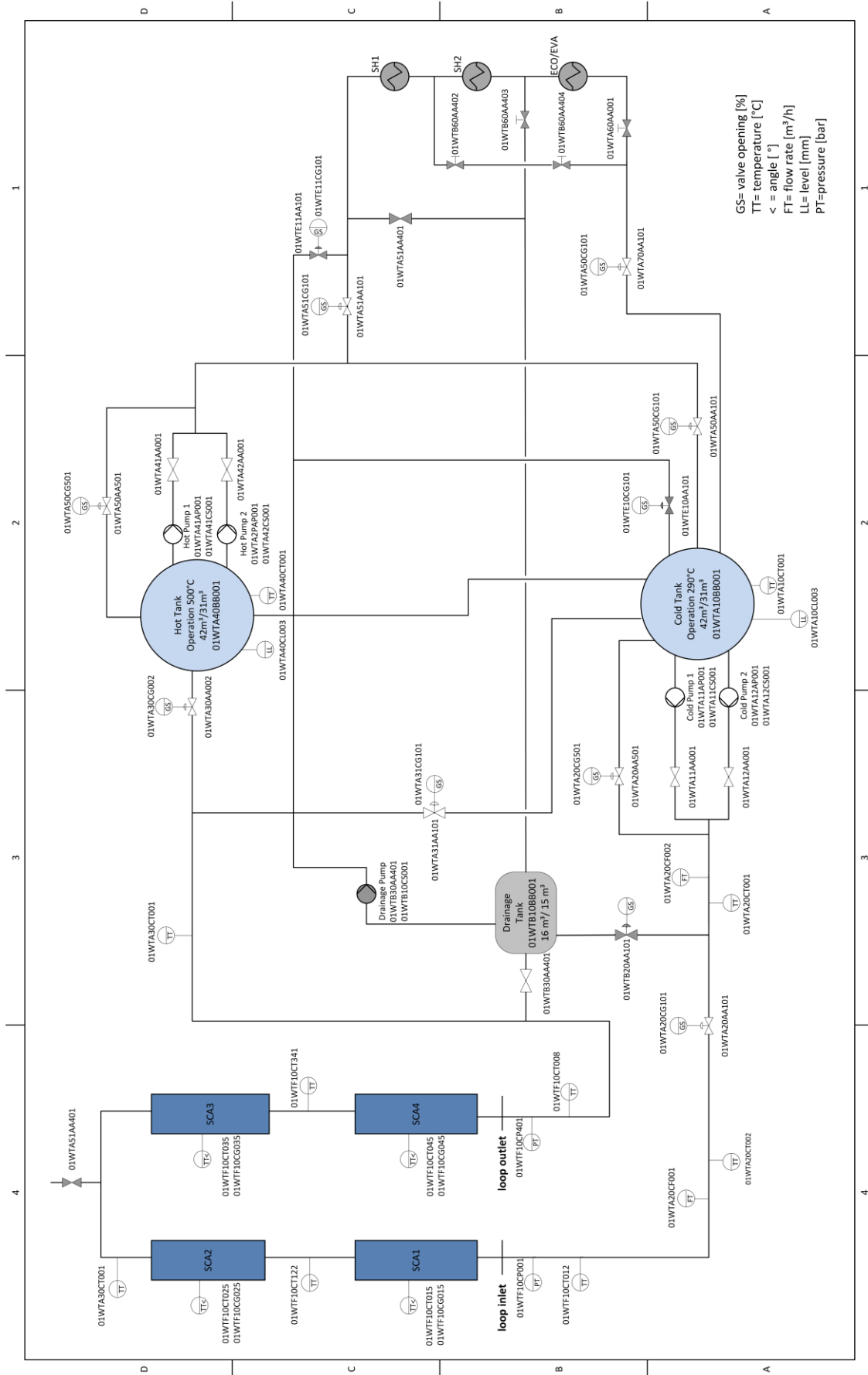


Abbildung 9: Schema der zu simulierenden Anlage (nach P&amp;ID [21]).

Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die Bestandteile der Anlage<sup>9</sup>, inklusive KKS-Nummern und einer kurzen Beschreibung.

**Tabelle 1: Auflistung und Beschreibung der einzelnen Anlagenkomponenten (nach [21]).**

Komponente	KKS-Nummer	Beschreibung
<b>Kollektoren:</b>		
SCA 1	-	Kollektor 1
SCA 2	-	Kollektor 2
SCA 3	-	Kollektor 3
SCA 4	-	Kollektor 4
<b>Salztanks:</b>		
Hot Tank	01WTA40BB001	Heißer Salztank (500°C)
Cold Tank	01WTA10BB001	Kalter Salztank (290°C)
Drainage Tank	01WTB10BB001	Tank zur Systemdrainage
<b>Pumpen:</b>		
Cold Pump 1	01WTA11AP001	Pumpe 1, kalter Tank
Cold Pump 2	01WTA12AP001	Pumpe 2, kalter Tank
Hot Pump 1	01WTA41AA001	Pumpe 1, heißer Tank
Hot Pump 2	01WTA42AA001	Pumpe 2, heißer Tank
Drainage Pump	01WTB30AA401	Pumpe 1, Drainagetank
<b>Ventile:<sup>10</sup></b>		
Valve Cold Pump 1	01WTA11AA001	Magnet-Ventil (0/1)
Valve Cold Pump 2	01WTA12AA001	Magnet-Ventil (0/1)
Valve Cold Header	01WTA20AA101	Stellungsgeregeltes Ventil (0-100%)
Valve Bypass CT	01WTA20AA501	Stellungsgeregeltes Ventil (0-25%)
Valve SF→Drain	01WTA30AA401	Stellungsgeregeltes Ventil (0-100%)
Valve Header→HT	01WTA30AA002	Stellungsgeregeltes Ventil (0-100%)
Valve Header→CT	01WTA31AA101	Stellungsgeregeltes Ventil (0-100%)
Valve Hot Pump 1	01WTA41AAP001	Magnet-Ventil (0/1)
Valve Hot Pump 2	01WTA42AAP001	Magnet-Ventil (0/1)
Valve HT→CT	01WTA50AA101	Stellungsgeregeltes Ventil (0-100%)
Valve Bypass HT	01WTA50AA501	Stellungsgeregeltes Ventil (0-25%)

---

<sup>9</sup> Im weiteren Verlauf der Arbeit beziehen sich die Begriffe *Anlage* und *Kraftwerk* auf das zu simulierende Anlagen- bzw. Kraftwerksmodell.

<sup>10</sup> Eigene Bezeichnungen.

Valve HT→SGS	01WTA51AA101	Stellungsgeregeltes Ventil (0-100%)
Valve SGS 1	01WTA51AA401	Magnet-Ventil (0/1)
Valve SGS 2	01WTA60AA001	Handventil, inaktiv
Valve SGS 3	01WTA70AA101	Stellungsgeregeltes Ventil (0-100%)
Valve CT→Drain	01WTB20AA101	Stellungsgeregeltes Ventil (0-100%), inaktiv
Valve SGS 4	01WTB60AA402	Handventil, inaktiv
Valve SGS 5	01WTB60AA403	Handventil, inaktiv
Valve SGS 6	01WTB60AA404	Handventil, inaktiv
Valve SGS 7	01WTE11AA101	Stellungsgeregeltes Ventil (0-100%), inaktiv
Valve Drain→CT	01WTE10AA101	Stellungsgeregeltes Ventil (0-100%), inaktiv
<b>Wärmeübertrager</b>		
SH1	-	Überhitzer 1, inaktiv
SH2	-	Überhitzer 2, inaktiv
ECO/EVA	-	Vorwärmer, Verdampfer, inaktiv

## 3.2 Resultierende Anforderungen an die Simulationssoftware

Auf Basis des soeben spezifizierten Anlagenmodells und den zu Beginn von Abschnitt 3 erwähnten Vorgaben, lassen sich die Anforderungen für die im Rahmen dieser Arbeit zu erstellende Simulatorversion ableiten. Diese lassen sich in funktionale und nicht-funktionale Anforderungen aufteilen. Die funktionalen Anforderungen spezifizieren die wesentlichen Funktionalitäten und Dienste, welche der Simulator bereitstellen soll und dienen als Grundlage für den Aufbau der Software. Bei den nicht-funktionalen Anforderungen handelt es sich hingegen um Rahmenbedingungen, welche der Entwicklung und dem Betrieb der Anwendung auferlegt werden.

### 3.2.1 Funktionale Anforderungen

Das Solarfeld stellt das zentrale Element der solarthermischen Pilotanlage da. Hier bietet die Integration des sehr umfangreichen und realitätsnahen Simulationstools VSF dem Projekt die Chance, eine sehr detaillierte Simulation des Solarfeldverhaltens zu gewährleisten. Für diesen Zweck soll der Simulator zwei voneinander unabhängige, zu

Anwendungsstart auswählbare Simulationsmodi besitzen, den *Test Mode* und den *Operation Mode*.

Der *Test Mode* stellt eine stark vereinfachte Variante der Hauptanwendung dar und ist als eine Art Nebenprodukt der eigentlichen Arbeit anzusehen. Dieser Betriebsmodus des Simulators ist auf die Simulation des Kollektorfeldes begrenzt und soll dem Benutzer die Analyse des Solarfeldverhaltens unter Variation sämtlicher Eingangsparameter ermöglichen. Hierfür soll die Anwendung die Verläufe aller Ein- und Ausgangswerte des Kollektorfeldes grafisch darstellen sowie eine tabellarische Anzeige der Simulationshistorie erlauben. Die Simulation soll hierbei in benutzerdefinierter Geschwindigkeit ausgeführt und beliebig unterbrochen und fortgesetzt werden können. Darüber hinaus soll auf Wunsch des Anwenders ein Abspeichern der von ihm festgelegten Datensätze in Excel-Dateien (.csv) möglich sein.

Der eigentliche, der realen Leitwarte nachzuempfindende Simulator, verbirgt sich hinter der Bezeichnung *Operation Mode*. Sofern nicht explizit erwähnt, beziehen sich sämtliche weitere Ausführungen dieser Arbeit auf diesen Teil der Anwendung. Im Folgenden werden die wesentlichen funktionalen Anforderungen an diese Hauptanwendung näher beschrieben.

#### **Realitätsnahe Funktionalität der Anlagenkomponenten**

Der Simulator soll das Verhalten der einzelnen Komponenten sowie die zugehörigen Steuer- und Regelmöglichkeiten der Leitwarte möglichst exakt nachbilden. Da der Fokus dieser Arbeit auf dem Solarfeld- und Speichersystem der Anlage liegt, sollen diese beide Bestandteile den höchsten Detailierungsgrad erhalten. Das Speichersystem soll hierbei über einen Masse-Integrator sowie eine quasistationäre Energiebilanz für die Temperatur mit modifizierbaren Wärmeverlusten realisiert werden und zu Simulationsbeginn vom Benutzer initialisiert werden können. Die für die Massenbilanz maßgebenden Pumpen und Ventile sollen ein linearisiertes Verhalten besitzen sowie die Stellzeit der realen Bauteile berücksichtigen.

Der Dampferzeuger ist kein Teil dieser Arbeit und soll zur Massen- und Energiebilanz des Modells nur über zwei vom Benutzer vorgebbare Konstantwerte beitragen (Massenstrom von Heißtank zu Kalttank sowie Temperatur bei Eintritt in Kalttank). Ebenso sollen auch die Wärmeverluste der Rohrleitungen außerhalb des durch das VSF-Tool modellierten Teilsystems vernachlässigt werden. Grund hierfür ist die Tatsache, dass die Wärmeverluste in den kürzeren Leitungsabschnitten der Anlage vernachlässigbar klein sind. Die langen Headerleitungen sind hingegen Teil des Virtual Solar Field-Modells, in

welchem sämtliche Wärmeverluste berücksichtigt werden. Die visuelle Darstellung aller in diesem Abschnitt genannten Elemente sollen dem Erscheinungsbild der realen Leitwarte nachgeahmt werden und dynamisches Verhalten aufweisen.

### **Simulation eines Tagesverlaufs**

Um dem Benutzer ein alltagsähnliches Training zu bieten, soll der Trainingssimulator die Simulation eines vollständigen Tagesverlaufes ermöglichen. Hierbei soll die Anwendung eine Zeitraffer-Funktion beinhalten, welche Simulationsgeschwindigkeiten von bis zu 60-mal schneller als Echtzeit erlaubt. Zudem soll ein Unterbrechen und Fortsetzen der Simulation während der kompletten Simulationszeit gewährleistet sein. Die Umgebungsfaktoren bzw. Umwelteinflüsse, welche das Verhalten der Anlage über einen Tag hinweg spezifizieren, sollen über vorverarbeitete Excel-Tabellen (.csv-files) eingelesen werden. Zu diesen Umgebungsfaktoren gehören unter anderem die solare Einstrahlung je Kollektor mit zugehörigem  $f_{\text{geff}}$  (siehe Kapitel 2.3.1), die Umgebungstemperatur und Windgeschwindigkeit sowie der Einfallswinkel der Sonne und der optimale Fokussierwinkel der Kollektoren  $\Phi_{\text{track}}$ . Hierbei ist anzumerken, dass aufgrund der relativ geringen Solarfeldgröße die solare Einstrahlung sowie die daraus resultierende effektive Einstrahlung in dieser Anlagenkonfiguration für alle Kollektoren dieselben Werte besitzt (dies trifft ebenfalls auf den Track-Winkel zu). Um ggf. auch Kollektorabhängige Einstrahlungswerte verwenden zu können, sind entsprechende Funktionalitäten jedoch bereits in dieser Softwareversion integriert. Die Auswahl des gewünschten zu simulierenden Tagesverlaufes soll der Benutzer im Zuge der Initialisierung vornehmen können. Hierfür soll die Anwendung entsprechend vorgefertigte Datensätze für diverse Tagesverläufe bereitstellen (Details siehe Kapitel 4.1).

### **Leittechnik**

Die Leittechnik – inklusive simulierter Leitwarte – soll sich an der *Functional Description* [17] [18] [19] der realen Anlage sowie am Steuerungskonzept der Projektpartner orientieren.

Im Zuge dieser Arbeit soll dafür ein Massenstromregler implementiert werden, welcher die Druckdifferenz  $pdiff$  als Stellgröße besitzt und dem Benutzer die Vorgabe des Massenstroms durch das Solarfeld ermöglicht.

Darüber hinaus sollen die Kollektor-Schutzfunktionen *Übertemperaturschutz* und *Schutz vor zu hoher Windlast* im Simulator integriert werden.

#### **Segmentierte Bedienoberfläche(Detailansichten)**

Die Benutzeroberfläche des Leitsystems soll ein Übersichtsfenster über die gesamte Anlage besitzen und darüber hinaus in Detailansichten untergliedert sein, welche in separaten Fenstern dargestellt werden. Diese Detailansichten sollen die Steuerung der jeweilig enthaltenen Kraftwerkskomponenten bewerkstelligen und eine detaillierte Ansicht der Komponenten besitzen. Im Gegensatz dazu soll das Übersichtsfenster keine Steuerung der Anlage zulassen, sondern die wesentlichen Anzeigeelemente enthalten, welche dem Benutzer einen ganzheitlichen Überblick über den Anlagenstatus ermöglichen. Die Navigation zwischen den einzelnen Steuerungsansichten soll über Buttons stattfinden, was der Vorgabe des Bedienkonzepts der realen Anlage entspricht.

#### **Anzeige von Signalverläufen und Simulationshistorie**

Zur Analyse des Anlagenverhaltens soll der Simulator alle wesentlichen Signalverläufe des Leitsystems grafisch abbilden. Die anzuzeigenden Verläufe sollen hierbei durch den Benutzer selektiert werden können. Für ein exaktes Auslesen vergangener Werte soll zusätzlich die Simulationshistorie in tabellarischer Form zur Verfügung stehen. Darüber hinaus soll der Anwender einen sogenannten *Freeze Mode* aktivieren können, in welchem die Simulation zwar weiterläuft, die Daten in Graph und Historie jedoch eingefroren sind. Dies soll dem Benutzer ein besseres Handling der Analysetools ermöglichen.

#### **Abspeichern benutzerdefinierter Datensätze**

Die in der Historie aufgenommenen Daten sollen auf Wunsch des Benutzers in eine *.csv-file* abgelegt werden. Dies soll über ein Auswahlfenster geschehen, über welches der Benutzer die abzuspeichernden Datensätze, wie zum Beispiel Temperaturen, Massenströme, etc., frei wählen kann.

### **3.2.2 Nicht-funktionale Anforderungen**

Da diese Arbeit den Grundstein für den zukünftigen Simulator legt, werden in diesem Abschnitt die nicht-funktionalen Anforderungen vorgestellt, welche für eine Wiederverwendbarkeit und Ausweitung der Simulationssoftware unerlässlich sind.

#### **Modifizierbarkeit**

Um eine effiziente Weiterentwicklung des Simulators zu gewährleisten, muss den späteren Softwareentwicklern eine Einarbeitung in den bestehenden Code mit vertretbarem Aufwand möglich sein. Hierfür muss der Code eine leicht nachvollziehbare Struktur erhalten, welche dem Entwickler ein einfaches Verständnis des Gesamtsystems

ermöglicht. Dies soll über eine feine Granulierung der Software in überschaubare VIs<sup>11</sup> gewährleistet werden. Darüber hinaus sind eine gute Dokumentation der Software sowie eine sinnvolle Kommentierung des Quellcodes für dieses Verständnis unabdingbar.

### **Modularität**

Eine Untergliederung des Simulators in wesentliche Anlagenbestandteile soll eine hohe Modularität der Software erzwingen. Ziel ist dabei, das spätere Ersetzen von Teilsystemen durch präzisere Modelle zu erleichtern. Darüber hinaus wird damit die Wartbarkeit der Software begünstigt, da die Änderung von anlagenspezifischen Parametern an zentralisierten Stellen vorgenommen werden kann.

### **Portabilität**

Die Simulationssoftware ist mit LabVIEW® zu erstellen und soll möglichst umstandslos auf weiteren Windows-Rechnern ausgeführt werden können. Dafür ist auch die für das Ausführen der Anwendung benötigte Laufzeitumgebung bereitzustellen.

### **Benutzerfreundlichkeit**

Eine intuitive, klar strukturierte Bedienoberfläche ist für eine angenehme Handhabung sowie einen geringen Einarbeitungsaufwand in die Anwendung unerlässlich. Dabei soll sich das HMI am Leittechniksystem „SPPA-T3000“ von SIEMENS® orientieren. Das integrierende Solarfeldmodell VSF soll dabei als für den Benutzer nicht ersichtlicher Hintergrundprozess laufen, welcher weder eine Shell hervorruft, noch in der Taskleiste auftaucht.

## **3.3 Grundlegende Designentscheidungen**

Dieser Abschnitt skizziert den wesentlichen Leitfaden in Bezug auf Aufbau und Funktion der umgesetzten Software und basiert auf den Anforderungen aus dem vorangegangenen Kapitel. Hierbei wird neben der Systemarchitektur sowie der Struktur der Bedienoberfläche auch auf die Kommunikation mit Virtual Solar Field eingegangen, da diese eine Hauptaufgabe des Simulators darstellt und mitbestimmend für den Aufbau der Software ist.

### **3.3.1 Systemarchitektur**

Die Systemarchitektur umfasst die zentralen Punkte Teilsystem, Zeitmanagement und Programmablaufschema, welche im Folgenden näher skizziert werden.

---

<sup>11</sup>Virtuelles Instrument, LabVIEW®-spezifische Bezeichnung für einen Programmbaustein.

## Teilsysteme

Um die geforderte Modularität der Software zu erreichen, ist es wichtig, das „Gesamtsystem Simulator“ in funktionale Teilbereiche zu unterteilen. Dies soll eine weitgehend unabhängige Implementierung dieser Teilsysteme ermöglichen und klar abgegrenzte Schnittstellen und Funktionsbereiche definieren.<sup>12</sup> Diese im folgenden vorgestellten Teilsysteme lassen sich wiederum in die Bereiche *Physikalische Modelle*, *Simulationsmanagement/Datenhandling* und *Leittechnik* aufteilen. Abbildung 10 soll eine Übersicht über diese Aufteilung geben und die Interaktion der einzelnen Bestandteile versinnbildlichen.

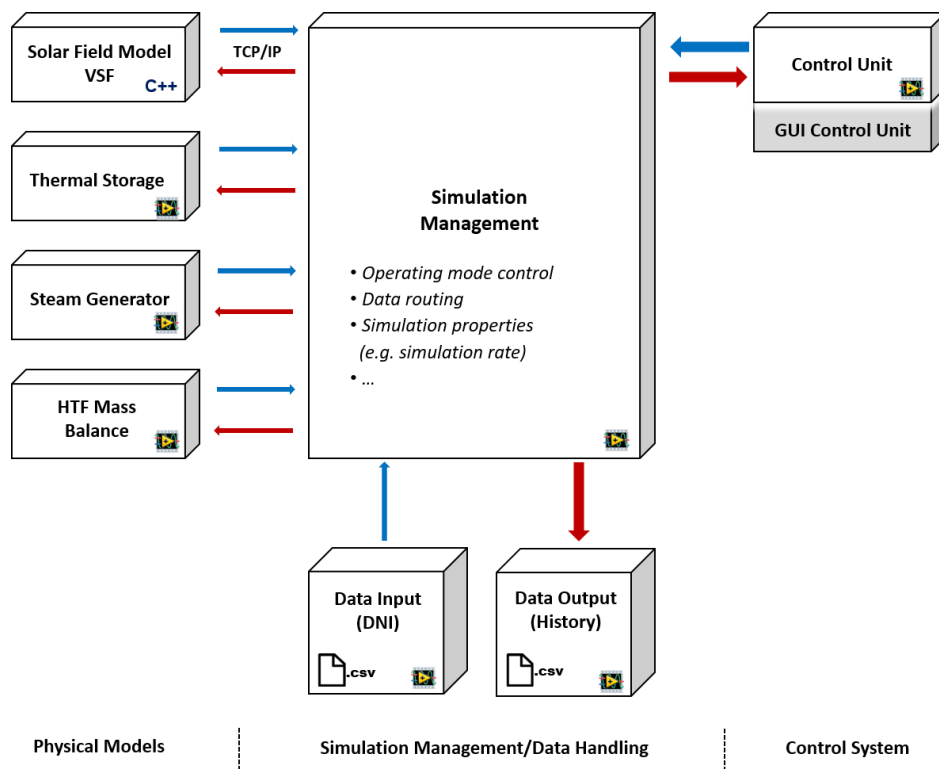


Abbildung 10: Vereinfachtes Schema des Simulators.

Die einzelnen Komponenten der Pilotanlage lassen sich in die vier Teilsysteme *Solarfeld*, *Speichersystem*, *Dampferzeuger* und *HTF Massenbilanz* zusammenfassen, welche die *physikalischen Modelle* der Anlage repräsentieren.

Grundlegendstes Teilsystem ist hierbei das Solarfeld. Dieses Teilsystem wird durch das externe, in C++ - Code umgesetzte Simulationsmodell VSF realisiert. Die Kommunikation erfolgt hierbei via TCP/IP. Eine detaillierte Beschreibung dieses Moduls ist in Kapitel 2.3.2 dieser Arbeit zu finden.

<sup>12</sup>Es ist anzumerken, dass das daraus resultierende Schema als Leitfaden für die Implementierung des Simulators zu sehen ist, jedoch nicht die Struktur des Codes widerspiegelt.



Der Sektor *Speichersystem* umfasst das Tanksystem der Anlage und lässt sich in die Bestandteile *Heißer Tank* und *Kalter Tank* weiter untergliedern.

Umfangreichster Teil des Simulators ist das Modul *HTF Massenbilanz*. Hier sind sämtliche Ventile und Pumpen des Modells sowie der Massenstromregler enthalten. Dieses Modul repräsentiert den Massenstrom durch die gesamte Anlage und interagiert dadurch mit sämtlichen Teilsystemen.

Das Teilsystem *Dampferzeuger* enthält den in dieser Basisversion des Simulators umzusetzenden Wärmeübertrager und stellt im Rahmen dieser Arbeit eine Art Provisorium für weitere Entwicklungen dar.

Das *Leitsystem* ist als eigenständiger Teil des Simulators zu betrachten. Dieses enthält sowohl das HMI mit den Zugriffsmöglichkeiten für den Benutzer, als auch die Steuerungstechnik, welche zukünftig um die in der *Functional Description* [17] [18] [19] definierten Funktionen erweitert werden soll.

Für die Simulation eines Tagesverlaufs und das Abspeichern von Simulationsverläufen werden externe Daten in Form von *.csv-files* verwendet. Das Einlesen und Ablegen von diesen Daten findet in ausgelagerten Softwaremodulen statt (siehe Abbildung 10).

Der *Simulationsmanager* stellt das zentrale Element des Simulators dar. Hier wird unter anderem das Routen von Daten sowie das Steuern des Simulationsablaufs übernommen. Im Rahmen dieser Arbeit sind *Simulationsmanager* und *Steuerungssystem* miteinander verknüpft und bilden somit nur ein Teilsystem.

## **Zeitmanagement**

Entsprechend den Anforderungen soll die Simulationsgeschwindigkeit im Bereich von 1 bis 60-facher Echtzeit variabel sein. Darüber hinaus muss eine Synchronisation der einzelnen Teilsysteme (speziell VSF) gewährleistet werden. Dies wird in der Software durch eine mit variablem Zeitfaktor versehene While-Schleife in Verbindung mit Schieberegistern realisiert. Dieses Konstrukt befindet sich in der obersten VI-Hierarchieebene des Anwendungsmodi *Operation Mode* und besitzt zusätzlich eine Case-Verzweigung, um das Anhalten und Fortführen der Simulation zu ermöglichen. In dieser Ablaufsteuerung der Simulation sind sämtliche zeitabhängigen Teilsysteme enthalten. Ein vereinfachtes Schema dieses Konzepts ist in Abbildung 11 dargestellt.

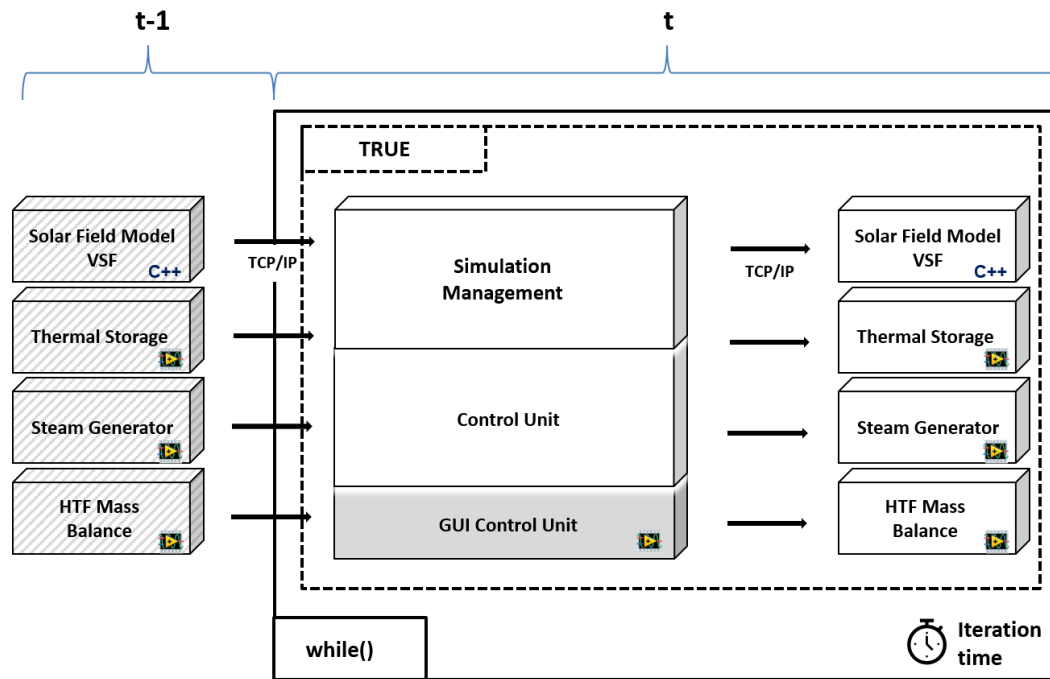


Abbildung 11: Vereinfachtes Schema der Ablaufsteuerung.

Jedes Teilsystem führt innerhalb der durch den Parameter *Iteration time* vorgegebenen Zeit genau eine Berechnung durch. Intention dieser Berechnung ist die Ermittlung der Werte des entsprechenden Teilsystems für einen Simulationszeitraum von exakt einer Sekunde. Dieser definierte Simulationszeitraum (eine Sekunde pro Berechnungsschritt) ist in allen Teilsystemen festgesetzt.

Es folgt ein Beispiel zur Illustration dieses Zeitmanagements:

Bei einer gewünschten Simulationsgeschwindigkeit von zweifacher Echtzeit ( $1\text{ s Echtzeit} = 2\text{ s Simulationszeit}$ ) und einem (dauerhaft) festgesetzten Simulationszeitraum je Berechnung von einer Sekunde, müssen zwei Berechnungsschritte innerhalb einer Sekunde Echtzeit durchgeführt werden. Nach dieser einen Sekunde Echtzeit erhält man somit die Ergebnisse von zwei Berechnungsschritten á einer Sekunde simulierter Zeit. Folglich wird alle 500 ms Echtzeit eine Berechnung für eine Sekunde Simulationszeit durchgeführt. Damit beträgt die Iteration time 500 ms.

Basis für diese Berechnungen sind die Eingangsparameter des vorangegangenen Zeitschritts sowie die Parameter der Steuereinheit des aktuellen Zeitschritts. Durch den in allen Teilsystemen festgesetzten Simulationszeitraum von einer Sekunde je Berechnungsaufforderung, bestimmt allein die Vorgabe des Faktors *Iteration time* die Geschwindigkeit der Simulation. Dies sollen auch folgende drei Beispiele verdeutlichen:

$Iteration\ time = 1000\ ms \rightarrow 1\text{ s Echtzeit} = 1\text{ s Simulationszeit (Echtzeit)}$

$Iteration\ time = 500\ ms \rightarrow 1\text{ s Echtzeit} = 2\text{ s Simulationszeit (2-fache Echtzeit)}$

*Iteration time = 250 ms → 1 s Echtzeit = 4 s Simulationszeit (4-fache Echtzeit)*

....

Limitierende Faktoren für die minimale *Iteration time* (und damit die maximale Simulationsgeschwindigkeit) sind hierbei die Berechnungsdauer von *VSF* zuzüglich der benötigten Zeit für den Datenaustausch mit ebendiesem Modell, sowie die benötigte Kalkulationszeit des LabVIEW®-Programms selbst.

### Programmablaufschemata

Die beiden Betriebsmodi *Test Mode* und *Operation Mode* sowie das Simulationsmodell *VSF* stellen die hochrangigsten Bestandteile der Simulationssoftware da. Abbildung 12 bildet das stark vereinfachte Programmablaufschemata des Simulators in Bezug auf diese Bestandteile ab.<sup>13</sup>

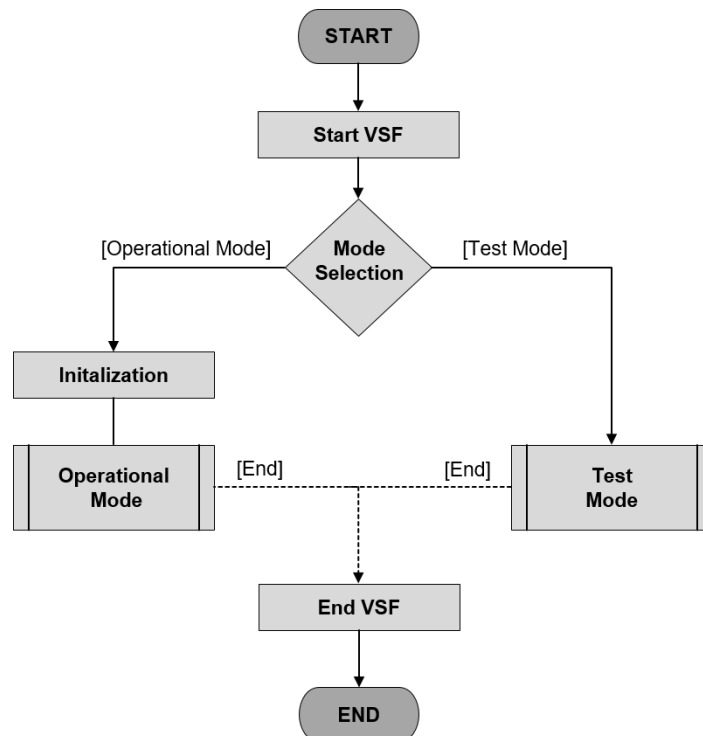


Abbildung 12: Stark vereinfachtes Programmablaufschemata der Simulationssoftware.

### 3.3.2 Kommunikation mit Virtual Solar Field

Da *VSF* über den LabVIEW®-seitigen TCP/IP-Client Bestandteil der in Kapitel 3.3.1 beschriebene Zeitschleife ist, ist der Zeitparameter *deltaT* auch in diesem Teilsystem auf eine Sekunde festgesetzt. Alle weiteren Ein- und Ausgangsvariablen des Solarfeldmodells sind innerhalb spezifizierter Wertebereiche variabel und basieren auf den Grenzen des

<sup>13</sup> Stark vereinfachte Ablaufschemen-Variante. Basiert nicht auf DIN 66001.

VSF-Modells sowie auf Erfahrungswerten von Entwicklungsingenieuren. Eine Übersicht über diese Wertebereiche sowie den Datentyp (und ggf. die zugehörige KKS-Nummer) des jeweiligen Parameters wird in nachfolgenden Tabelle 2 und Tabelle 3 gegeben. Eine Beschreibung der einzelnen Parameter ist in Kapitel 2.3.2 zu finden.

**Eingangsparameter VSF (*LabVIEW*<sup>®</sup>→*VSF*):****Tabelle 2: Spezifikation der Eingangsparameter von VSF.**

Parameter	Wertebereich	Einheit	Datentyp
<i>deltaT</i>	1	s	Integer
<i>tIn</i>	0-600	°C	Double
<i>gEff1</i>	0-1000	Watt/m <sup>2</sup>	Double
<i>gEff2</i>	0-1000	Watt/m <sup>2</sup>	Double
<i>gEff3</i>	0-1000	Watt/m <sup>2</sup>	Double
<i>gEff4</i>	0-1000	Watt/m <sup>2</sup>	Double
<i>pDiff</i>	1e-8 - 15	bar	Double
<i>gs1</i>	1e-4 – 100	%	Double
<i>phiD1Set</i>	0-2.3	°	Double
<i>phiD2Set</i>	0-2.3	°	Double
<i>phiD3Set</i>	0-2.3	°	Double
<i>phiD4Set</i>	0-2.3	°	Double
<i>tAmb</i>	(-10) - 50	°C	Double

Es ist anzumerken, dass sämtliche Gleitkommazahlen in amerikanischer Schreibweise (d.h. mit Punkt als Trennzeichen) übergeben werden müssen. Des Weiteren besitzen *pdiff* sowie *gs1* untere Grenzwerte, welche anstelle von Null in Kraft treten. Grund hierfür sind entstehende numerische Fehler in VSF im Falle einer Übergabe von Null.

**Ausgangsvariablen VSF (*VSF*→*LabVIEW*<sup>®</sup>):****Tabelle 3: Spezifikation der Ausgangsparameter von VSF.**

Parameter	Wertebereich	Einheit	Datentyp	KKS-Nummer
<i>timeElapsed</i>	0-∞	s	Integer	-
<i>tSCA1</i>	0-600	°C	Double	01WTF10CT015
<i>tSCA2</i>	0-600	°C	Double	01WTF10CT025
<i>tSCA3</i>	0-600	°C	Double	01WTF10CT035
<i>tSCA4</i>	0-600	°C	Double	01WTF10CT045
<i>tP1</i>	0-600	°C	Double	01WTA20CT002

<i>tP2</i>	0-600	°C	Double	01WTF10CT012
<i>tP3</i>	0-600	°C	Double	01WTF10CT122
<i>tP4</i>	0-600	°C	Double	01WTA30CT001
<i>tP5</i>	0-600	°C	Double	01WTF10CT341
<i>tP6</i>	0-600	°C	Double	01WTF10CT008
<i>tP7</i>	0-600	°C	Double	01WTA30CT001
<i>ft2</i>	0-100	m <sup>3</sup> /s	Double	01WTA20CF001
<i>pt1</i>	0-100	Pascal	Double	01WTF10CP001
<i>pt2</i>	0-100	Pascal	Double	01WTF10CP401
<i>phiD1act</i>	0-2,3	°	Double	01WTF10CG015
<i>phiD2act</i>	0-2,3	°	Double	01WTF10CG025
<i>phiD3act</i>	0-2,3	°	Double	01WTF10CG035
<i>phiD4act</i>	0-2,3	°	Double	01WTF10CG045

### 3.3.3 Bedienoberfläche

Entsprechend den spezifizierten Anforderungen soll das Leitsystem auf mehrere Fenster mit unterschiedlichen Zugriffs- und Anzeigemöglichkeiten aufgeteilt werden. Daraus resultieren folgende Steuerungsansichten:

- *Overall View*
- *Hot Salt Tank*
- *Cold Salt Tank*
- *Solar Mirror Panels*

Zentrales Element der Nutzerschnittstelle stellt das Übersichtsfenster *Overall View* da. Dieses enthält eine Übersicht über alle Anlagenkomponenten samt den wichtigsten Anzeigeelementen. Dieses Fenster ermöglicht es dem Anwender, den Status der Anlage in relativ kurzer Zeit zu überblicken. Jedoch ist über dieses Fenster kein Eingriff in den Prozess möglich. Die Steuerungsansicht *Overall View* besitzt eine Kopfzeile, welche Umgebungsparameter wie z.B. die solare Einstrahlung und die Windgeschwindigkeit anzeigt und darüber hinaus die aktuelle Uhrzeit (Simulationszeit) und das Datum (Simulationsdatum) enthält. Die Ablaufsteuerung der Simulation (*Start/Stop*, *Freeze Mode*, etc.) befindet sich in der Fußzeile dieses Fensters. Über diese Fußzeile kann zudem das Abspeichern von Daten sowie die Anzeige der Signalverläufe und der Historientabelle initiiert werden. Diese Funktionen sind wiederum in die separaten Fenster *Save*, *Chart* und *History* extrahiert.

Ein Eingriff des Bedieners in den laufenden Kraftwerksprozess wird über die Detailansichten *Hot Salt Tank*, *Cold Salt Tank* und *Solar Mirror Panels* ermöglicht. Diese, in separate Fenster ausgelagerte Ansichten, enthalten die Steuerelemente der entsprechend abgebildeten Anlagenkomponenten sowie sämtliche Informationen und Statusanzeigen ebendieser.

Der Aufruf dieser Detailansichten erfolgt über entsprechende Navigationsbuttons im Übersichtsfenster. Für eine komfortable Navigation besitzen alle Detailansichten zudem die Möglichkeit, sich auch gegenseitig aufzurufen. Darüber hinaus können sämtliche Detailansichten parallel angezeigt und nach Belieben verschoben, minimiert, geschlossen und wieder geöffnet werden. Das Übersichtsfenster bleibt dabei ständig als Vollbild im Hintergrund erhalten.

Die resultierende Fenster-Struktur wird in Abbildung 13 noch einmal verdeutlicht.

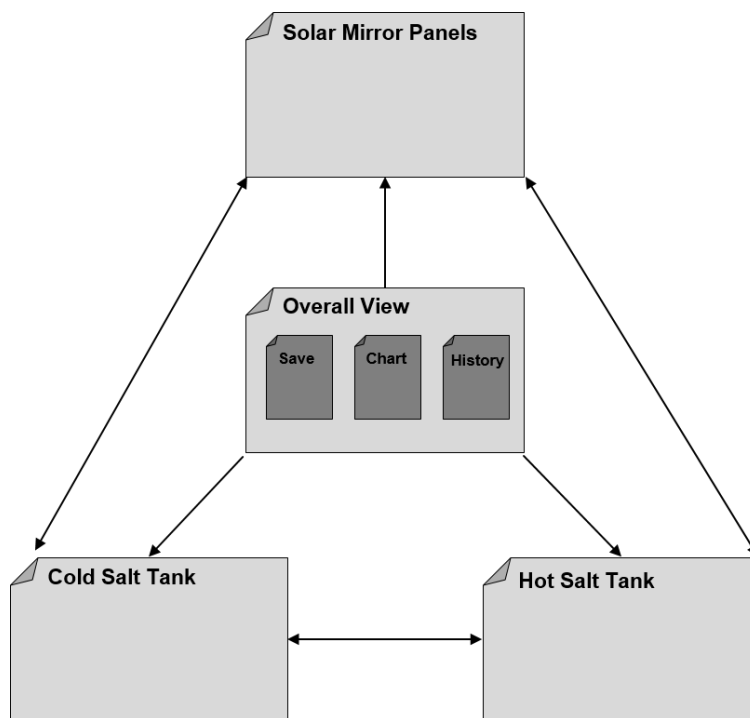


Abbildung 13: Fenster-Struktur der Bedienoberfläche.

## 4 Umsetzung

In diesem Kapitel wird die im Rahmen dieser Arbeit entstandene Simulationssoftware vorgestellt. Die folgenden Abschnitte sollen hierfür eine Übersicht über den Funktionsumfang und die Handhabung der Anwendung geben. Es ist noch einmal anzumerken, dass sich – sofern nicht explizit erwähnt – sämtliche Ausführungen dieser Arbeit auf den *Operation Mode* beziehen (siehe Kapitel 3.2).

Im ersten Teil wird die Umsetzung des physikalischen Modells beschrieben. Hierbei wird sowohl auf das hinterlegte Modell und die Funktion der einzelnen Anlagenkomponenten, als auch auf die visuelle Darstellung der Elemente in der Benutzeroberfläche eingegangen.

Im zweiten Unterkapitel wird die realisierte Leittechnik aufgezeigt. Hierbei wird speziell auf die Bedienoberfläche, den Massenstromregler sowie die umgesetzten Schutzfunktionen Bezug genommen.

Im letzten Teil wird die Handhabung des Simulators dargestellt. Diese bezieht sich auf den *Operation Mode* und umfasst die Funktionen *Initialisierung einer Simulation*, *Anzeige von Signalverläufen und Simulationshistorie* sowie *Abspeichern von Daten*. Abschließend wird ein Überblick über den Funktionsumfang des *Test Modes* gegeben.

An dieser Stelle soll dem Leser vorab ein kleiner Eindruck des grafischen Programmiersystems LabVIEW® sowie der Idee des Datenflussprinzips vermittelt werden (siehe Abbildung 14).

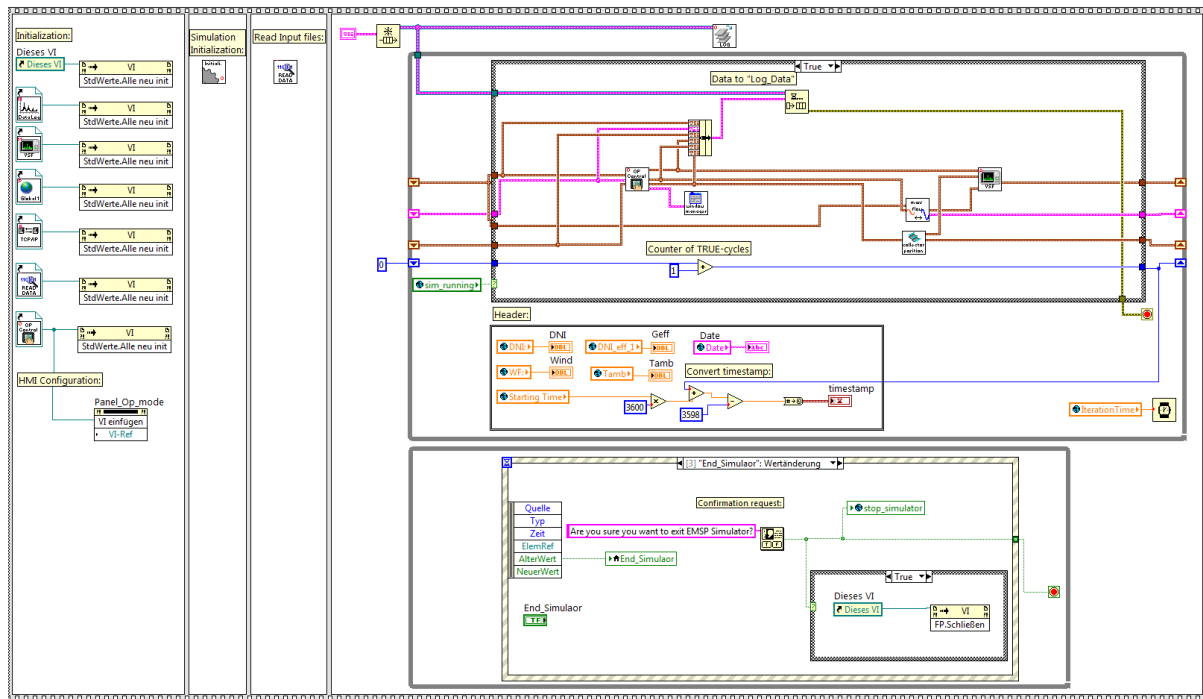


Abbildung 14: Blockdiagramm des VIs "operation\_mode".

Das abgebildete VI befindet sich in der zweiten Hierarchieebene der Simulationssoftware und stellt die Umsetzung des in Kapitel 3.3.1 konzipierten Zeitmanagements des *Operation Modes* da. Eine Übersicht über die vollständige VI-Hierarchie ist in Anhang A2 zu finden.

## 4.1 Physikalisches Modell

Im Folgenden wird die Umsetzung der verschiedenen Anlagenbestandteile in der Simulationssoftware beschrieben. Hierbei stehen das hinterlegte Modell sowie die Funktionsweise der Komponenten im Vordergrund. Zudem wird das visuelle Verhalten der Bauteile vorgestellt.<sup>14</sup>

Die für die physikalischen Modelle benötigten Tagesverlaufsparameter werden zu Beginn der Simulation aus drei externen *.csv-files* eingelesen und in LabVIEW® vorverarbeitet. Ein solcher Datensatz repräsentiert einen zu simulierenden Tag und enthält folgende, mit Zeitstempel ( $\Delta t = 10$  s) versehene Werte:

- DNI-Werte für SCA 1 bis SCA 4 [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

<sup>14</sup> Mit Orientierung am Bedienkonzept von SIEMENS®, abgeleitet aus *SIEMENS-Operation User Guide (8/23)* [33].



- DNI-Umrechnungsfaktor  $f_{\text{geff}}$  [n.a.]
- Track-Winkel  $\Phi_{\text{track}}$  [°]
- Einstrahlungswinkel  $\Phi_{\text{inc}}$  [°]
- Umgebungstemperatur  $t_{\text{Amb}}$  [°C]
- Windgeschwindigkeit  $v_{\text{wind}}$  [m/s]

Die hierbei verwendeten Werte stammen aus entsprechenden Messstationen der *Plataforma Solar de Almería (PSA)*<sup>15</sup> und sind partiell durch künstliche Daten ersetzt bzw. erweitert worden.

Abbildung 15 stellt einen Auszug der für das Solarfeld relevanten Werte eines solchen Datensatzes grafisch dar.

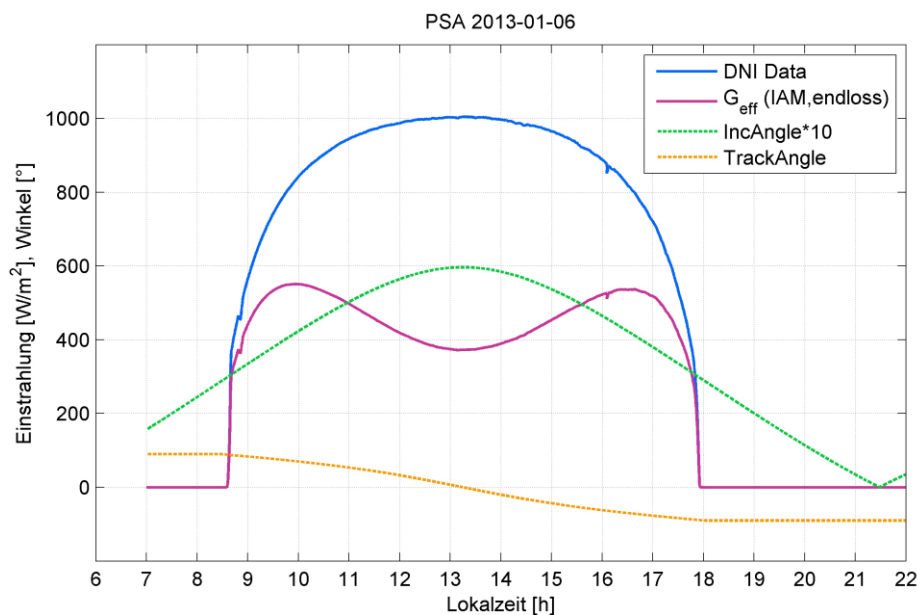


Abbildung 15: Auszug aus Tagesverlaufsdaten (Datensatz 2013-01-06).

#### 4.1.1 Kollektoren

Die Ausrichtungen der Kollektoren stellen zusammen mit dem Massenstrom durch das Solarfeld die zentralen Steuerelemente für die Prozesstemperatur am Solarfeldaustritt und somit auch für den Energieeintrag in das Gesamtsystem dar. Hierbei ist auf die begriffliche Abgrenzung zwischen einem Kollektormodul (SCE) und einem Kollektor (SCA), welcher aus mehreren Kollektormodulen zusammengesetzt ist, zu achten.

Die Positionierungen der Kollektoren findet in der realen Anlage durch Servomotoren statt, welche eine Stellgeschwindigkeit von  $0,2^\circ/\text{s}$  besitzen [30]. Die Positionsvorgabe der SCAs erfolgt anhand der jeweiligen Stellwinkel  $\Phi$ . Referenz für diese Winkel ist der

<sup>15</sup> Für weitere Informationen siehe [35].

Horizont in Richtung Osten, welcher die  $0^\circ$ -Marke repräsentiert (siehe Abbildung 16). Der Stellbereich eines Kollektors ist auf  $-14^\circ \leq \Phi \leq 181^\circ$  [18] begrenzt.

### Simulationsmodell der Kollektoren

Das umgesetzte Simulationsmodell der Kollektoren basiert ebenfalls auf diesen Grundlagen. Der Anwender kann zur Steuerung eines Kollektors über ein Drop-Down-Menü dessen Betriebsmodus auswählen. Die möglichen Betriebsmodi eines SCAs werden nachfolgend erläutert.

#### *Stow-Mode:*

*Stow* bezeichnet den Parkmodus eines Kollektors. Wird dieser Modus aktiviert, wird der Kollektor (unabhängig von der aktuellen Position) in Richtung Parkposition gefahren. Die Parkposition ist auf  $-5^\circ$  [30] festgelegt (siehe Abbildung 16).

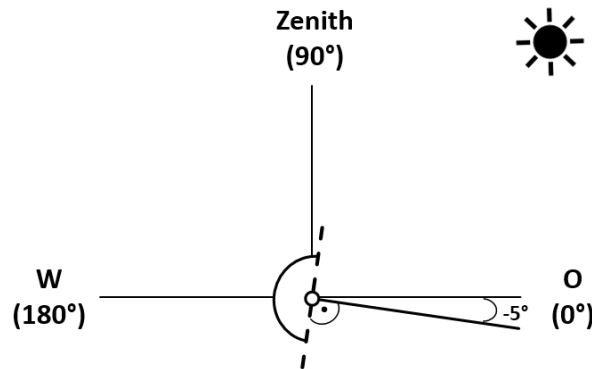


Abbildung 16: Skizze der Kollektor-Parkposition.

#### *Track-Mode:*

Das grundsätzliche Bestreben des *Track-Modes* liegt in einer 100-prozentigen Fokussierung des Kollektors. Die Ausrichtung der Spiegel folgt dabei der Winkelvorgabe  $\Phi_{\text{track}}$  (siehe Abbildung 17). Dieser, vom Stand der Sonne abhängige Winkel, wird von der Software aus den eingelesenen Tagesverlaufsdaten bezogen.

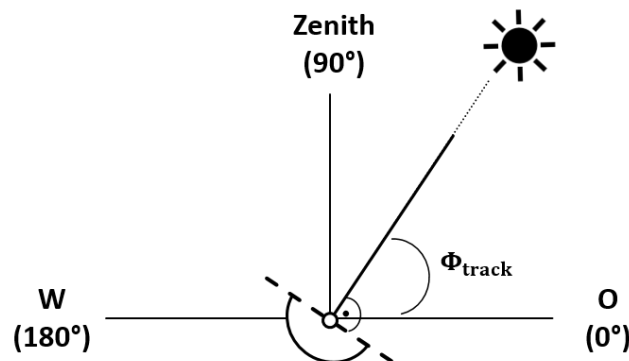


Abbildung 17: Definition des Fokussier-Winkels  $\Phi_{\text{track}}$ .

Darüber hinaus hat der Benutzer die Möglichkeit, eine Fokussierabweichung  $\Phi_D$  für den Kollektor vorzugeben. Über diese Fokussierabweichung kann die Einstrahlung und somit der Wärmeeintrag des Kollektors gesteuert werden. Ein  $\Phi_D$  von  $2,3^\circ$  entspricht dabei einer vollständigen Defokussierung des Kollektors, welche keine Einstrahlung mehr zulässt [31]. Nachstehende Skizze soll dies verdeutlichen.

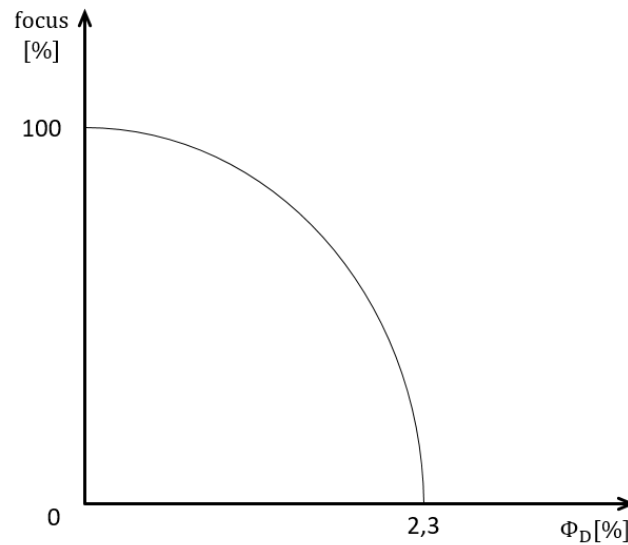


Abbildung 18: Fokus des Kollektors in Bezug auf die Fokussierabweichung  $\Phi_D$  (Näherung, nach [30]).

Hieraus resultiert eine Vorgabemöglichkeit der Fokussierabweichung im Bereich von  $0^\circ < \Phi_D \leq 2,3^\circ$  [31]. Es ist anzumerken, dass  $\Phi_D$  den Betrag der Fokussierabweichung darstellt. Systemintern findet eine Defokussierung aus Sicherheitsgründen immer in Richtung Osten statt, um eine ungewollte Fokussierung aufgrund der Wanderung der Sonne (Ost→West) unter allen Umständen zu vermeiden (siehe Abbildung 19).

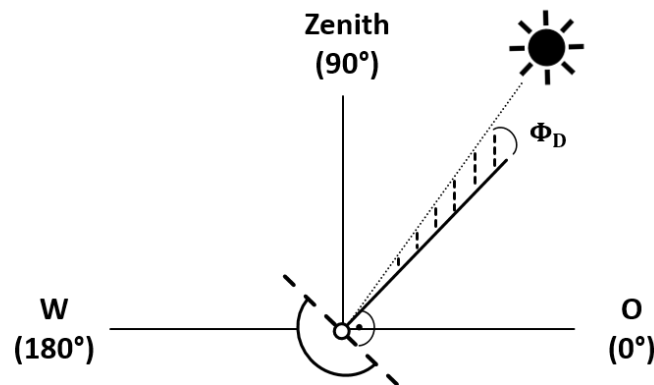


Abbildung 19: Skizze der möglichen Fokussierabweichung eines SCAs.

*Defocus-Mode:*

Bei Aktivierung des *Defocus-Modes* wird dem Kollektor eine Fokussierabweichung  $\Phi_D$  von exakt  $2,3^\circ$  in Richtung Osten gegenüber der optimalen Fokussiervorgabe  $\Phi_{\text{track}}$  aufgezwungen (siehe Abbildung 19).

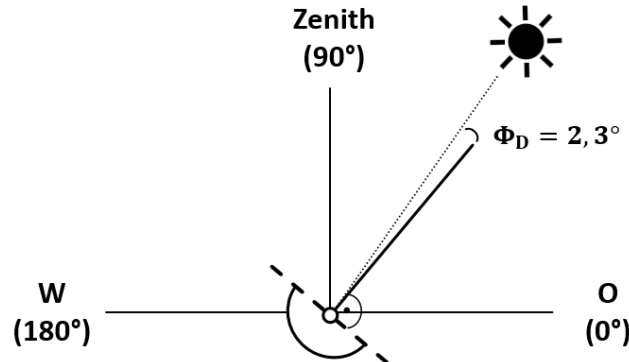



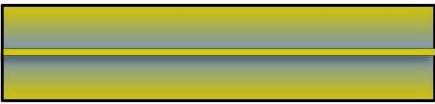


Abbildung 20: Fokussierabweichung  $\Phi_D$  im *Defocus-Mode*.

Vorteil dieses Modi ist, bei Bedarf eine rasche Fokussierung des Kollektors aufgrund eines kleinen Stellweges gewährleisten zu können.

### Visuelle Darstellung

Je SCA existieren drei verschiedene Darstellungsformen in Bezug auf die aktuelle Position, sowie ein Alarmzustand. Die Zustände *Parkposition* und *Fokussiert* sind hierbei jeweils für einen exakten Winkel definiert, wohingegen der Zustand *Defokussiert* den Übergangsbereich zwischen diesen Winkeln abdeckt. Die einzelnen Zustände werden in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Visuelle Zustände der Kollektoren.

Zustand	Darstellung	Beschreibung
Parkposition		$\Phi = -5^\circ$ → Kollektor befindet sich in Parkposition
Fokussiert		$\Phi = \Phi_{\text{track}}$ → Kollektor ist vollständig fokussiert
Defokussiert		$-5^\circ < \Phi < \Phi_{\text{track}}$ → Kollektor befindet sich zwischen Parkposition und $\Phi_{\text{track}}$
Alarm		→ symbolisiert Fehlfunktion des Kollektors → mit allen Zuständen kombinierbar

### 4.1.2 Zwei-Tank-Salzspeichersystem

Das Speichersystem der Anlage besteht aus einem kalten- und einem heißen Salzspeichertank. Die Füllstände und Temperaturen der Tanks basieren im Wesentlichen auf zwei Vorgängen, dem „Ladevorgang (charge)“ und dem „Entladevorgang (discharge)“ [29]. Beim „Laden“ wird Salz aus dem kalten Salztank durch das Solarfeld gepumpt, über dieses erhitzt und schließlich im heißen Tank gespeichert. Im Entladevorgang wird Salz aus dem heißen Salztank genutzt um über die Wärmeüberträger Dampf zu erzeugen. Das erkaltete Salz strömt daraufhin in den kalten Salztank zurück. Beide Vorgänge können parallel erfolgen, was eine Besonderheit von Systemen mit Salz als Wärmeträgermedium darstellt. Abbildung 21 bildet das Schema eines solchen Speichersystems ab.

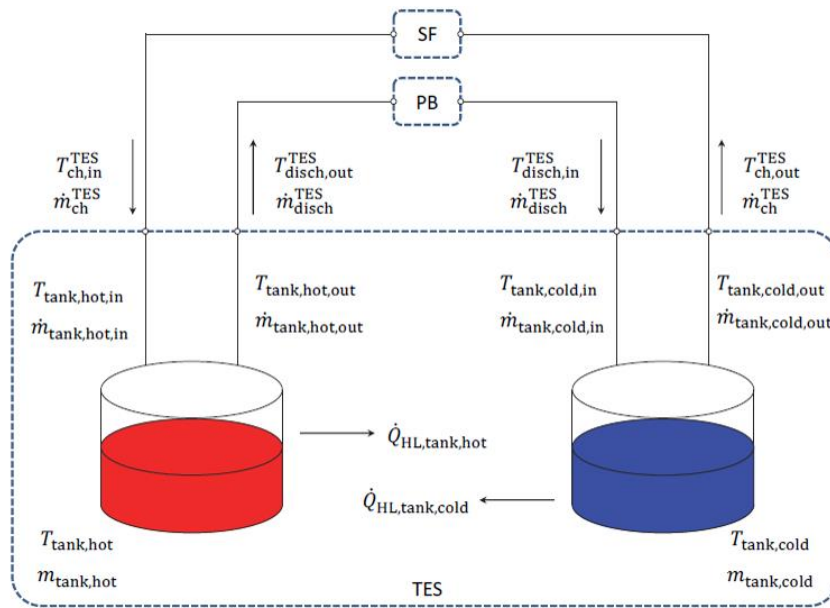


Abbildung 21: Schema eines Zwei-Tank-Speichersystems [32].

Die spezifizierten Abkürzungen werden im Folgenden erläutert (nach [32]):

$T_{\text{ch}}^{\text{TES}}$ : Temperature Thermal Energy Storage, Charge [°C]

$T_{\text{disch}}^{\text{TES}}$ : Temperature Thermal Energy Storage, Discharge [°C]

$\dot{m}_{\text{ch}}^{\text{TES}}$ : Mass Flow Thermal Energy Storage, Charge [kg/s]

$\dot{m}_{\text{disch}}^{\text{TES}}$ : Mass Flow Thermal Energy Storage, Discharge [kg/s]

$\dot{Q}$ : Heat Loss [W]

### Simulationsmodell des Speichersystems

Das nachfolgend beschriebene, in der Software realisierte Modell des Speichersystems, basiert auf [23], [32] und [33] sowie auf anlagenspezifischen Daten<sup>16</sup>.

Die Massenbilanz eines Tanks basiert auf den Eingangs- und Ausgangsmassenströmen sowie der aktuell enthaltenen Masse. Daraus folgt nachstehende, diskretisierte Formel:

$$M_{\text{tank}}^t = M_{\text{tank}}^{t-\Delta t} + \dot{m}_{\text{in,tank}}^{t-\Delta t} \Delta t - \dot{m}_{\text{out,tank}}^{t-\Delta t} \Delta t \quad , \text{ mit}$$

( $t-\Delta t$ ): vorhergehender Zeitschritt

$M$ : Masse [kg]

$\dot{m}$ : Massenstrom [kg/s]

Damit folgt für die Füllstandhöhe  $L$  [mm] des Tanks, in Abhängigkeit des Tankradius  $r_{\text{Tank}}$  [m] und der temperaturabhängigen Dichte  $\rho(t)$  [kg/m<sup>3</sup>]:

$$L^t = \frac{M_{\text{Tank}}^t}{\rho^t \cdot r^2 \cdot \pi}$$

Die Ermittlung der Temperatur  $T$  [°C] des im Tank gespeicherten Wärmeträgermediums erfolgt über die spezifische Enthalpie  $h$  [kJ/kg] und ist von der Massenbilanz in Kombination mit der spezifischen Enthalpie der Masse sowie von Wärmeverlusten und dem elektrischen Energieeintrag (Begleitheizung) abhängig:

$$h_{\text{tank}}^t = \frac{1}{M_{\text{tank}}^t} \cdot (M_{\text{tank}}^{t-\Delta t} \cdot h_{\text{tank}}^{t-\Delta t} + \dot{m}_{\text{in,tank}}^{t-\Delta t} \cdot h_{\text{in,tank}}^{t-\Delta t} \Delta t - \dot{m}_{\text{out,tank}}^{t-\Delta t} \cdot h_{\text{out,tank}}^{t-\Delta t} \Delta t - \dot{Q}_{\text{HL}}^{t-\Delta t} \Delta t \cdot 10^{-3} + P_{\text{aux,el}}^{t-\Delta t} \Delta t \cdot 10^{-3}) \quad , \text{ mit:}$$

$h$ : spezifische Enthalpie [kJ/kg]

$\dot{Q}$ : Wärmeverluste [W]

$P$ : Elektrischer Energieeintrag [W] (vorerst 0)

Die Umrechnung zwischen spezifischer Enthalpie und Temperatur ist folgendermaßen definiert:

$$T \rightarrow h: \quad h^t = a \cdot T^{2t} + b \cdot T^t \quad \text{und}$$

$$h \rightarrow T: \quad T^t = -\frac{b}{2a} + \sqrt{\frac{4 \cdot h^t \cdot a + b^2}{4 \cdot a^2}} \quad , \text{ mit}$$

---

<sup>16</sup> Im Besonderen sind dies die Stoffdaten des verwendeten Salzes *HitecXL* (Siegel) [37].

$a = -0,0001625$  und  $b = 1,539$  (nach [34]).

Aus diesen Formeln ergeben sich schließlich folgende Tankmodelle, basierend auf den entsprechenden Eingangs- und Ausgangsmassenströmen des jeweiligen Tanks:

### Kalter Tank

Masse:

$$M_{CT}^t = M_{CT}^{t-\Delta t} + \dot{m}_{in,SGS}^{t-\Delta t} \Delta t + \dot{m}_{in,HT}^{t-\Delta t} \Delta t + \dot{m}_{in,Drainage}^{t-\Delta t} \Delta t + \dot{m}_{in,Overflow}^{t-\Delta t} \Delta t \\ + \dot{m}_{in,Bypass}^{t-\Delta t} \Delta t - \dot{m}_{out,Pump1}^{t-\Delta t} \Delta t - \dot{m}_{out,Pump2}^{t-\Delta t} \Delta t$$

Spezifische Enthalpie:

$$h_{CT}^t = \frac{1}{M_{CT}^t} \cdot (M_{CT}^{t-\Delta t} \cdot h_{CT}^{t-\Delta t} + \dot{m}_{in,SGS}^{t-\Delta t} \cdot h_{in,SGS}^{t-\Delta t} \Delta t + \dot{m}_{in,HT}^{t-\Delta t} \cdot h_{in,HT}^{t-\Delta t} \Delta t \\ + \dot{m}_{in,Drainage}^{t-\Delta t} \cdot h_{in,Drainage}^{t-\Delta t} \Delta t + \dot{m}_{in,Overflow}^{t-\Delta t} \cdot h_{in,Overflow}^{t-\Delta t} \Delta t - \dot{m}_{out,Pump1}^{t-\Delta t} \cdot h_{out,Pump1}^{t-\Delta t} \Delta t \\ - \dot{m}_{out,Pump2}^{t-\Delta t} \cdot h_{out,Pump2}^{t-\Delta t} \Delta t - \dot{Q}_{HL}^{t-\Delta t} \Delta t \cdot 10^{-3} + 0)$$

Temperatur:

$$T_{CT}^t = -\frac{b}{2a} + \sqrt{\frac{4 \cdot h_{CT}^{t-\Delta t} \cdot a + b^2}{4 \cdot a^2}}$$

Füllstand:

$$L_{CT}^t = \frac{M_{CT}^t}{\rho_{CT}^t \cdot r_{CT}^2 \cdot \pi}$$

### Heißer Tank

Masse:

$$M_{HT}^t = M_{HT}^{t-\Delta t} + \dot{m}_{in,Solarfield}^{t-\Delta t} \Delta t + \dot{m}_{in,Bypass}^{t-\Delta t} \Delta t - \dot{m}_{out,Pump1}^{t-\Delta t} \Delta t - \dot{m}_{out,Pump2}^{t-\Delta t} \Delta t \\ - \dot{m}_{out,Overflow}^{t-\Delta t} \Delta t$$

Spezifische Enthalpie:

$$h_{HT}^t = \frac{1}{M_{HT}^t} \cdot (M_{HT}^{t-\Delta t} \cdot h_{HT}^{t-\Delta t} + \dot{m}_{in,Solarfield}^{t-\Delta t} \cdot h_{in,Solarfield}^{t-\Delta t} \Delta t + \dot{m}_{in,Bypass}^{t-\Delta t} \cdot h_{in,Bypass}^{t-\Delta t} \Delta t \\ - \dot{m}_{out,Pump1}^{t-\Delta t} \cdot h_{out,Pump1}^{t-\Delta t} \Delta t - \dot{m}_{out,Pump2}^{t-\Delta t} \cdot h_{out,Pump2}^{t-\Delta t} \Delta t - \dot{m}_{out,Overflow}^{t-\Delta t} \cdot h_{out,Overflow}^{t-\Delta t} \Delta t)$$

$$- \dot{Q}_{\text{HL}}^{\text{t}-\Delta\text{t}} \Delta t \cdot 10^{-3} + 0)$$

Temperatur:

$$T_{\text{HT}}^{\text{t}} = -\frac{b}{2a} + \sqrt{\frac{4 \cdot h_{\text{HT}}^{\text{t}} \cdot a + b^2}{4 \cdot a^2}}$$

Füllstand:

$$L_{\text{HT}}^{\text{t}} = \frac{M_{\text{HT}}^{\text{t}}}{\rho_{\text{HT}}^{\text{t}} \cdot r_{\text{HT}}^2 \cdot \pi}$$

Grundsätzlich besitzt die Anlagenkomponente *Tank* keine Steuerungsmöglichkeiten. Im Simulator kann der Anwender jedoch im Zuge der Simulationsinitialisierung die Tankfüllstände zu Simulationsbeginn sowie die Wärmeverluste vorgeben.

### Visuelle Darstellung

Der Heiße Tank besitzt in der Detailansicht *HotSaltTank*, folgendes Erscheinungsbild:

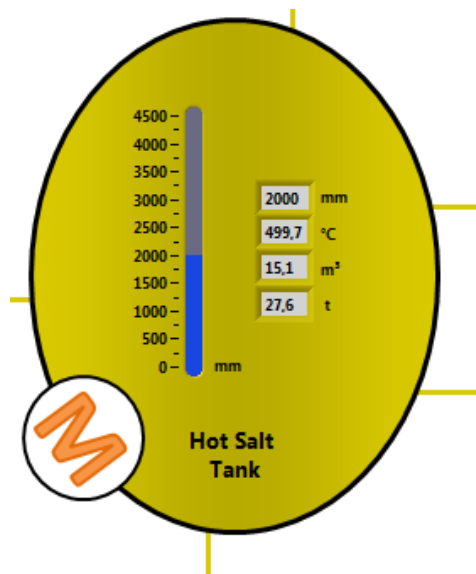


Abbildung 22: Visualisierung des heißen Salztanks.



Der Kalte Salztank wird folgendermaßen dargestellt:

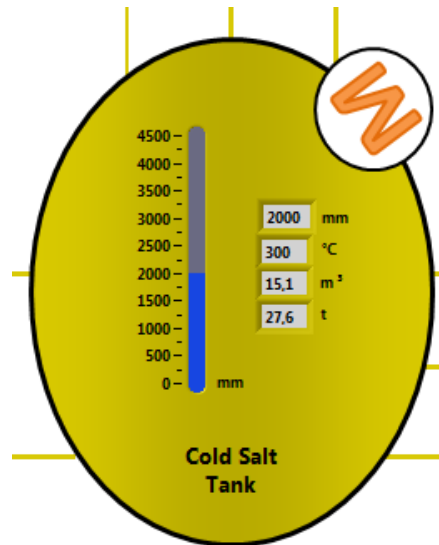


Abbildung 23: Darstellung des kalten Salztanks in *ColdSaltTank*.

### 4.1.3 Pumpen







Die Pumpen dienen zur Förderung des Wärmeträgermediums durch das System und sind das zentrale Steuerelement für die Massenbilanz der Anlage. Da zudem eine ständige Zirkulation des Wärmeträgermediums durch die Anlage gewährleistet sein muss um ein Erstarren des Salzes zu verhindern, wurden am Austritt jedes Speichertanks zwei redundante Pumpen verbaut. Dementsprechend ist immer nur eine der beiden Pumpen an jedem Tank aktiv (*Cold Pump 1* oder *Cold Pump 2* bzw. *Hot Pump 1* oder *Hot Pump 2*). Sämtliche Pumpen sind drehzahlgesteuert und liefern jeweils einen maximalen Druck von 13,81 bar, was einem Massenstrom von 12,3 kg/s (kalte Pumpe) entspricht [35].

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Modellierung der Pumpen außer Acht gelassen. Dies ist vorerst tolerierbar, da der Massenstrom auf Seiten des Solarfeldes über einen – im weiteren Verlauf der Arbeit implementierten – Massenstromregler vorgegeben wird, welcher die benötigte Druckdifferenz über das Solarfeld und somit auch den zu erbringenden Druck der Pumpen *Cold Pump 1* und *Cold Pump 2* vorgibt. Daher ist an dieser Stelle ein manuelles Einstellen des Pumpendrucks nicht zwingend erforderlich. Auf der simulationstechnisch stark vereinfachten Dampferzeugerseite der Anlage, wird die Funktion der Pumpen *Hot Pump 1* und *Hot Pump 2* durch einen seitens des Benutzers vorgebbaren Massenstrom  $\dot{m}_{HTOutlet}$  am Austritt des heißen Tanks ersetzt (siehe Abbildung 30).

## Visuelle Darstellung

Die Realisierung der Pumpendarstellung auf der Bedienoberfläche kann weitestgehend unabhängig vom hinterlegten Modell erfolgen. Dem Benutzer soll anhand des HMIs sofort ersichtlich sein, ob eine Pumpe im Moment läuft, gestoppt oder deaktiviert ist und ob diese sich im Hand- oder Automatikmodus befindet<sup>17</sup>. Darüber hinaus besitzen die Pumpen einen Alarmzustand analog zum Kollektoralarm. Sämtliche Zustände sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Visuelle Zustände der Pumpen.

Modus/Zustand	Darstellung	Beschreibung
Automatikmodus		- Pumpe im Automatikmodus - Modusanzeige unabhängig von Zustand
Handmodus		- Pumpe im Handmodus - Modusanzeige unabhängig von Zustand
Alarm		- Symbolisiert Fehlfunktion der Pumpe - Alarmanzeige unabhängig von Zustand
Pumpe läuft		- Pumpe aktiv
Pumpe gestoppt		- Pumpe inaktiv
Pumpe deaktiviert		- Pumpe deaktiviert

### 4.1.4 Ventile und Massenströme

Über die Ventile besitzt der Anlagenbediener eine weitere Möglichkeit, den Massenfluss der Anlage zu steuern. Hierbei werden folgende drei Ventiltypen verwendet:

*Handventile* besitzen keine Verbindung zur Leitwarte, werden in dieser jedoch aus Übersichtsgründen dargestellt. *Handventile* können ausschließlich händisch durch das Bedienpersonal vor Ort geöffnet bzw. geschlossen werden.

*Magnet-Ventile* können von der Leitwarte aus bedient werden, besitzen jedoch keinen Positionssensor und geben damit auch keinerlei Rückmeldung an die Steuereinheit. Diese

<sup>17</sup> Bezieht sich auf die weitere Entwicklung des Simulators. Weitere Informationen hierzu sind unter [19] zu finden.

Ventile können vom Bediener entweder vollständig geöffnet oder vollständig geschlossen werden. Die benötigte Zeit für das Öffnen/Schließen eines Ventils beträgt ca. fünf Sekunden.

*Stellungsgeregelte Ventile* besitzen einen internen Stellungsregler, welcher es der Leitwarte ermöglicht, eine Ventilstellung zwischen 0 und 100 Prozent vorzugeben. Das Stellglied benötigt für ein vollständiges Öffnen des Ventils ca. 15, für ein vollständiges Schließen ca. 25 Sekunden.

### **Simulationsmodell der Ventile und Einfluss auf den Massenstrom**

Die Steuerung der Magnet- und Stellungsgeregelten Ventile erfolgt im Simulator analog zur realen Leitwarte.

Das Öffnen und Schließen eines Magnetventils wird dem Benutzer durch einen Button ermöglicht. Im Gegensatz zur realen Anlage besitzen die Magnetventile im Simulator eine Anzeige der aktuellen Ventilstellung, um dem Anwender einen Eindruck der benötigten Stellzeit zu vermitteln. Diese Stellzeit entspricht der Stellzeit der realen Ventile.

Den Stellungsgeregelten Ventilen kann über ein Eingabefeld eine Sollposition zwischen 1-100 % vorgegeben werden. Auch hier bekommt der Benutzer eine Istposition des Ventils angezeigt. Die benötigten Stellzeiten werden ebenfalls berücksichtigt.

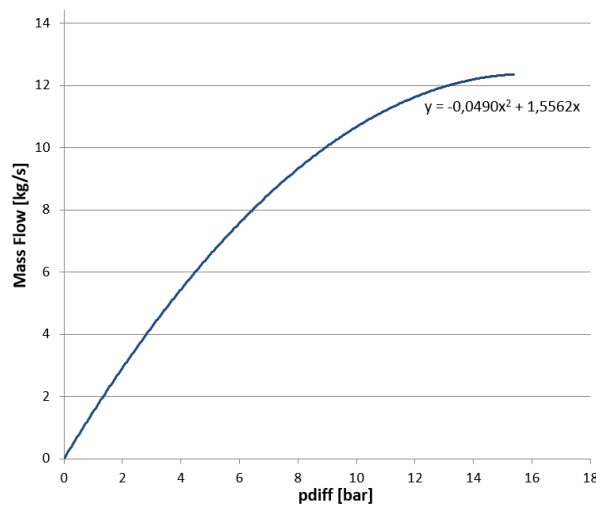
Da für die Rohrleitungen der Anlage kein Modell hinterlegt ist, müssen für die Implementierung der Ventile vereinfachte Annahmen getroffen werden, um den Einfluss dieser auf das System zu simulieren. Die daraus resultierenden Ventil-Modelle basieren großteils auf den Massenstrom-Kennlinien der realen Ventile (für einen bestimmten Betriebspunkt) in Verbindung mit den Gegebenheiten der Anlage. Die in der Simulationssoftware hinterlegten Modelle der einzelnen Ventile sowie die daraus resultierenden, simulierten Einflüsse auf den Massenstrom, werden nachfolgend erläutert. Die Massenströme sind hierbei nach den entsprechenden Ventilen bzw. den Headerleitungen benannt. Es ist anzumerken, dass die Ventile am Austritt der Speichertanks an dieser Stelle außen vor bleiben, da die zugehörigen Pumpen im Rahmen dieser Arbeit nicht implementiert wurden (siehe Kapitel 4.1.3) und die zugehörigen Ventile somit keinen Einfluss auf den Massenstrom besitzen.

#### *Ventil 01WTA20AA101 (Cold Header/SF Inlet):*

Dieses Ventil ist im Solarfeldmodell VSF integriert und besitzt direkten Einfluss auf die über dem Solarfeld anliegende Druckdifferenz  $pdiff=P2-P1$ , welche dem Simulationstool übergeben wird. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Massenstrom durch das

Solarfeld über einen Massenstromregler eingestellt wird. Dieser besitzt als Stellgröße die Druckdifferenz  $pdiff$ . Eine Verkleinerung des Rohrdurchschnitts (gedrosseltes Ventil), bei konstant gehaltenem Massenstrom, resultiert somit in einer höheren Druckdifferenz  $pdiff$ , welche durch den Regler vorgegeben wird. Diese Druckdifferenz wird in der Praxis über die Leistung der Pumpe realisiert, was jedoch noch nicht implementiert wurde. Begrenzender Faktor stellt hierbei die Pumpenleistung da.

Abbildung 24 veranschaulicht den Zusammenhang zwischen der anliegenden Druckdifferenz  $pdiff$  – als Eingangsparameter des Solarfeldmodells  $VSF$  – und dem resultierenden Massenstrom  $\dot{m}_{ColdHeader}$  durch das Solarfeld, unter der Annahme einer konstanten Dichte  $\rho$  und einem vollständig geöffneten Ventil 01WTA20AA101.



**Abbildung 24:** Massenstrom durch das Solarfeld in Abhängigkeit von  $pdiff$  (vereinfachte Trendlinie).

#### Ventil 01WTA20AA501 (Bypass CT):

Dieses sogenannte Bypassventil kann entsprechend der realen Anlage zu maximal 25% geöffnet werden und beeinflusst ebenfalls die Druckdifferenz  $pdiff$ . Das Öffnen des Ventils führt zu einem Massenstrom  $\dot{m}_{BypassCT}$  durch ebendieses. Daraus resultiert ein Druckabfall und folglich eine höhere Förderleistung der Pumpe, was sich durch ein kurzzeitig<sup>18</sup> niedrigeres  $pdiff$  äußert. Dieser Einfluss der Ventilöffnung auf  $pdiff$  erfolgt nach nachstehender implementierter Formel und wird in Abbildung 25 dargestellt.

$$\Delta pdiff = -1,6837 \cdot GS_{BypassCT} \quad , \text{ mit}$$

$GS$ : Ventilöffnung in %

<sup>18</sup> Siehe Kapitel 4.2.2 (Massenstrom-Regler).

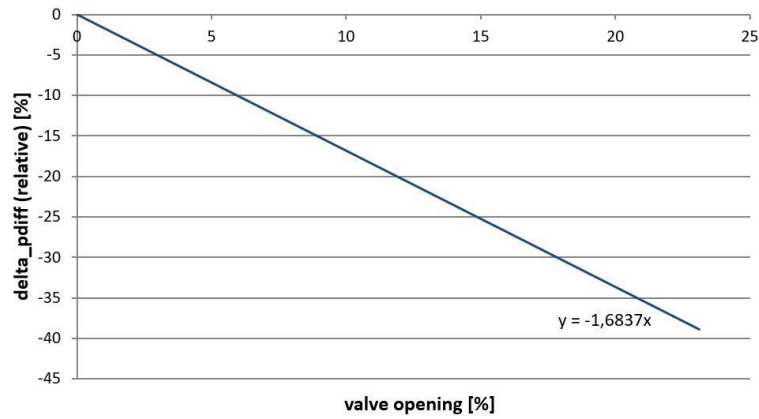


Abbildung 25: Einfluss des Ventils *Bypass CT* auf *pdiff*.

Der Massenstrom  $\dot{m}_{\text{BypassCT}}$  folgt der Formel

$$\dot{m}_{\text{BypassCT}} = 5,9104 \cdot GS_{\text{BypassCT}} \cdot \dot{m}_{\text{SF}}$$

entsprechend der in Abbildung 26 dargestellten Kennlinie.

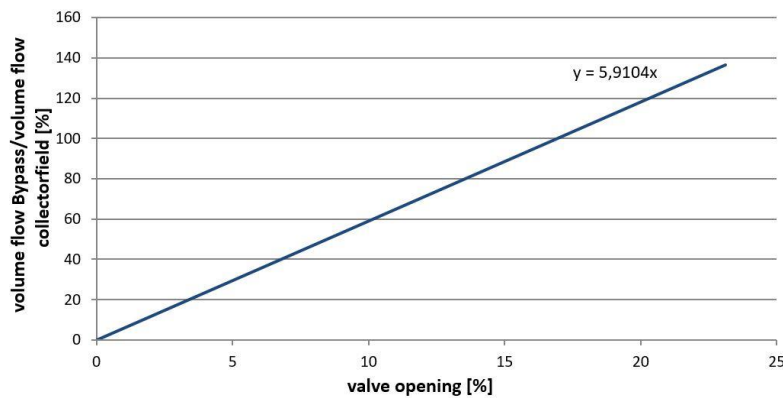


Abbildung 26: Volumenstrom Bypass/Volumenstrom SF in Abhängigkeit von  $GS_{\text{BypassCT}}$ .

Ventile am Solarfeld-Austritt (01WTB30AA401, 01WTA31AA101, 01WTA30AA002):

Die Ventile *SF*→*Drain* (01WTB30AA401), *Header*→*CT* (01WTA31AA101) und *Header*→*HT* (01WTA30AA002) werden an dieser Stelle zusammen beschrieben, da deren Kombination einen weiteren begrenzenden Faktor für den Massenstrom durch das Solarfeld darstellt. Dies ist in der Software vereinfacht durch einen Vergleich zwischen der Summe der drei Ventilöffnungen  $GS_{01WTB30AA401}$ ,  $GS_{01WTA31AA101}$  und  $GS_{01WTA30AA002}$  sowie der Ventilöffnung des Ventils *Cold Header* (01WTA20A101) realisiert. Der kleinere Faktor gibt den begrenzenden „Rohrdurchschnitt“ für das Solarfeldmodell VSF in Form des Parameters  $GS1$  vor (siehe Kapitel 2.3.2). Dadurch ändern sich implizit der Druckverlust im VSF-Modell und in der Folge der Massenstrom durch das Solarfeld. Durch den überlagerten Massenstrom-Regler resultiert dies in einer Änderung von *pdiff*. Das in Abbildung 27 skizzierte Blockschaltbild soll diese Logik verdeutlichen.

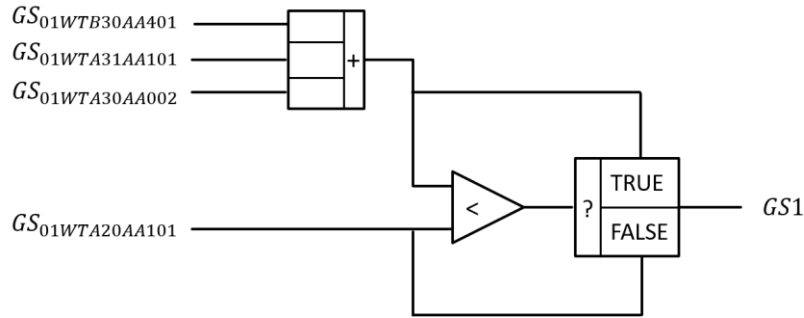


Abbildung 27: Vereinfacht dargestellte Logikschaltung zur Ermittlung von  $GS1$ .

Der Massenstrom durch die einzelnen Ventile ist abhängig vom resultierenden Massenstrom durch das Solarfeld und errechnet sich für jedes der drei Ventile auf Basis einer prozentualen Verteilung. Dies entspricht einer vereinfachenden Annahme von gleichen Ventilkennlinien und Einbauorten. Damit ergeben sich für die einzelnen Massenströme durch die Ventile folgende Formeln:

$$\begin{aligned}\dot{m}_{\text{DrainInletSF}} &= \frac{\dot{m}_{\text{ColdHeader}}}{GS_{\text{DrainInletSF}} + GS_{\text{CTInletHeader}} + GS_{\text{HTInletHeader}}} \cdot GS_{\text{DrainInletSF}} \\ \dot{m}_{\text{CTInletHeader}} &= \frac{\dot{m}_{\text{ColdHeader}}}{GS_{\text{DrainInletSF}} + GS_{\text{CTInletHeader}} + GS_{\text{HTInletHeader}}} \cdot GS_{\text{CTInletHeader}} \\ \dot{m}_{\text{HTInletHeader}} &= \frac{\dot{m}_{\text{ColdHeader}}}{GS_{\text{DrainInletSF}} + GS_{\text{CTInletHeader}} + GS_{\text{HTInletHeader}}} \cdot GS_{\text{HTInletHeader}}\end{aligned}$$

Ventile am Austritt des Heißen Tanks (01WTA50AA501, 01WTA51AA101, 01WTA50AA101):

Der durch den Benutzer am Austritt des Heißen Tanks vorgebbare Massenstrom verteilt sich ebenfalls nach prozentualen Anteilen. Hierbei ist anzumerken, dass diese Massenstromvorgabe von der Software nur dann ermöglicht wird, wenn die Summe der Öffnungen der Ventile *Bypass HT* (01WTA50AA501), *SGS Inlet* (01WTA51AA101) und *HT→CT* (01WTA50AA101) ungleich Null ist und damit ein Massenfluss durch das System gewährleistet werden kann.

Die Massenströme ergeben sich damit in Abhängigkeit der Ventilöffnungen und des vorgegebenen Austrittsmassenstroms  $\dot{m}_{\text{HTOutlet}}$  zu:

$$\dot{m}_{\text{BypassHT}} = \frac{\dot{m}_{\text{HTOutlet}}}{GS_{\text{SGInlet}} + GS_{\text{CTInletHT}} + GS_{\text{BypassHT}}} \cdot GS_{\text{BypassHT}}$$



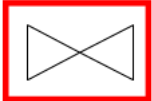








$$\dot{m}_{SGInlet} = \frac{\dot{m}_{HTOutlet}}{GS_{SGInlet} + GS_{CTInletHT} + GS_{BypassHT}} \cdot GS_{SGInlet}$$





$$\dot{m}_{CTInletHT} = \frac{\dot{m}_{HTOutlet}}{GS_{SGInlet} + GS_{CTInletHT} + GS_{BypassHT}} \cdot GS_{CTInletHT}$$

## Visuelle Darstellung

Die visuelle Darstellung der Ventile ist von der Ventilart abhängig und gibt Rückschluss auf die aktuelle Öffnung bzw. den aktuellen Stellvorgang (Öffnen/Schließen) des Ventils. Darüber hinaus ist auch hier ein Alarmzustand sowie eine Anzeige der Betriebsmodi (Automatik-, Handbetrieb) implementiert (siehe Tabelle 6).

**Tabelle 6: Visuelle Zustände der Ventile.**

Modus/Zustand	Darstellung	Beschreibung
<b>Magnet- &amp; Stellungsgeregelte Ventile (unabhängig von Zustand):</b>		
Automatikmodus		- Ventil im Automatikmodus - Achtung: Abweichung von Pumpe (Icon)
Handmodus		- Ventil im Handmodus
Alarm		- Symbolisiert Fehlfunktion des Ventils
<b>Steuerungsgeregelte Ventile:</b>		
geschlossen		- Ventil vollständig geschlossen
Stellvorgang (Schließen)		- Ventil befindet sich im Stellvorgang (Stellrichtung Schließen)
Zwischenposition		- Ventil befindet sich in einer Position zwischen 0 und 100%
Stellvorgang (Öffnen)		- Ventil befindet sich im Stellvorgang (Stellrichtung Öffnen)
geöffnet		- Ventil vollständig geöffnet
deaktiviert		- Ventil deaktiviert
<b>Magnet-Ventile:</b>		
geschlossen		- Ventil vollständig geschlossen
Stellvorgang (Schließen)		- Ventil befindet sich im Stellvorgang (Stellrichtung Schließen)

Stellvorgang (Öffnen)		- Ventil befindet sich im Stellvorgang (Stellrichtung Öffnen)
geöffnet		- Ventil vollständig geöffnet
deaktiviert		- Ventil deaktiviert
<b>Hand-Ventile:</b>		
deaktiviert		- Ventil deaktiviert

### 4.1.5 Dampferzeugersystem

Wie bereits in Kapitel 3.2.1 erwähnt, stellt das aus drei Wärmeübertragern bestehende Dampferzeugersystems keinen detailliert zu modellierenden Teil dieser Arbeit da. Im Rahmen des HPS2-Projekts soll ein dynamisches Modell des Dampferzeugers von einem anderen Projektpartner erstellt werden. Da der Dampferzeuger jedoch die Massen- und Energiebilanz der Anlage beeinflusst, hat der Anwender die Möglichkeit, den Salzmassenstrom in den Dampferzeuger (siehe Abbildung 30) sowie eine fiktive Austrittstemperatur des Salzes nach dem Dampferzeuger, daher beim Eintritt in den Kalten Tank (siehe Abbildung 28), vorzugeben.

#### Visuelle Darstellung

Das Dampferzeugersystem besteht aus den Komponenten *Erwärmer/Verdampfer (ECO/EVA)*, *Überhitzer 1 (SH1)* und *Überhitzer 2 (SH2)*. Diese Komponenten sind in der Bedienoberfläche abgebildet und besitzen statisches Anzeigeverhalten..

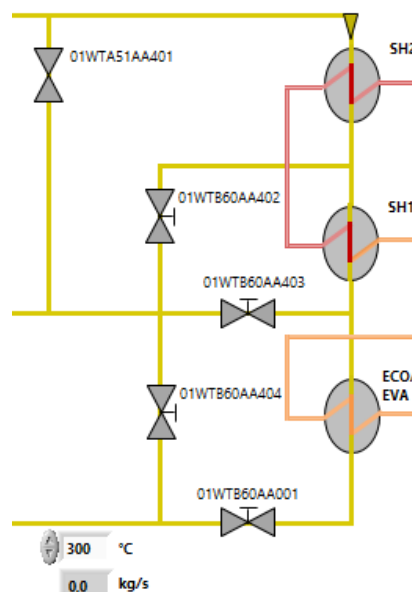


Abbildung 28: Visualisierung des Dampferzeugersystems.



## 4.2 Leittechnik

Dieses Unterkapitel stellt die umgesetzte Leittechnik vor. Der erste Abschnitt beschäftigt sich mit dem zentralen Element dieser Leittechnik, der Bedienoberfläche. Hierbei sollen die einzelnen Steuerungsansichten kurz vorgestellt werden. Auf periphere Ansichten und Funktionen, wie z.B. die Anzeigemöglichkeit von Signalverläufen, wird an dieser Stelle nicht eingegangen. Diese werden in Kapitel 4.3 erläutert.

Im zweiten Abschnitt wird der implementierte Regler für den Eingangsmassenstrom des Kollektorfeldes beschrieben. Abschließend werden die implementierten Schutzfunktionen der Kollektoren beschrieben, welche auf der Anlagenfunktionsbeschreibung *Functional Description* [17] [18] [19] basieren.

### 4.2.1 Bedienoberfläche

Die Leitwarte der Simulationssoftware besteht – entsprechend den Anforderungen und den daraus abgeleiteten Designentscheidungen – aus den vier Steuerungsansichten *Overall View*, *Hot Salt Tank*, *Cold Salt Tank* und *Solar Mirror Panels*.

Das Hauptfenster *Overall View* gibt einen Überblick über die Anlage und beinhaltet die wesentlichen Statusanzeigen der Komponenten. Darüber hinaus enthält diese Übersicht eine Statusleiste für die Anzeige relevanter Umgebungsparameter sowie der Uhrzeit und des Datums (Zeitsystem der Simulation). Die grau dargestellte Fußzeile ermöglicht die Steuerung der Simulation und bildet grundlegende Anwendungsfunktionen ab. Eine nähere Beschreibung hierzu ist in Kapitel 4.3 zu finden. Ein Eingriff des Anwenders in das System ist über diese Ansicht nicht möglich.<sup>19</sup> Eine künftige, übergeordnete Selektion der Betriebsmodi (Anfahren, Normalbetrieb, Anti-Freeze-Mode, etc.) könnte jedoch in dieser Ansicht stattfinden.

---

<sup>19</sup>Ausnahmen sind in Bezug auf diese Arbeit das Ventil *01WTA51AA101* sowie die Austrittstemperatur des Dampferzeugers. Diese Eingabeelemente werden zukünftig in eine weitere Detailansicht für den Dampferzeuger ausgelagert.

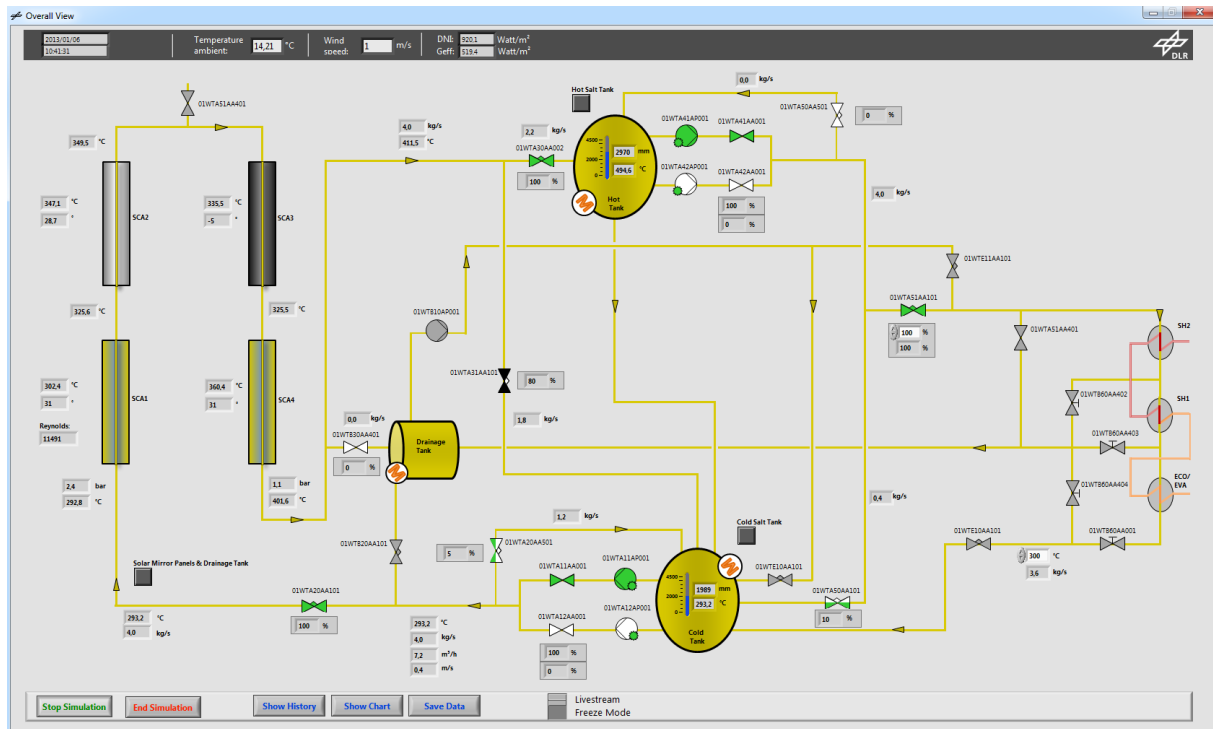


Abbildung 29: Steuerungsansicht *Overall View* (Für Großformat siehe Anhang A3).

Die Steuerungsansicht *Hot Salt Tank* enthält eine detaillierte Ansicht des heißen Salzspeichers und die diesem Bereich zugehörigen Ventile und Pumpen. Über dieses Fenster werden dem Benutzer eine Steuerung der abgebildeten Komponenten sowie eine Vorgabe des Austrittsmassenstroms ermöglicht.

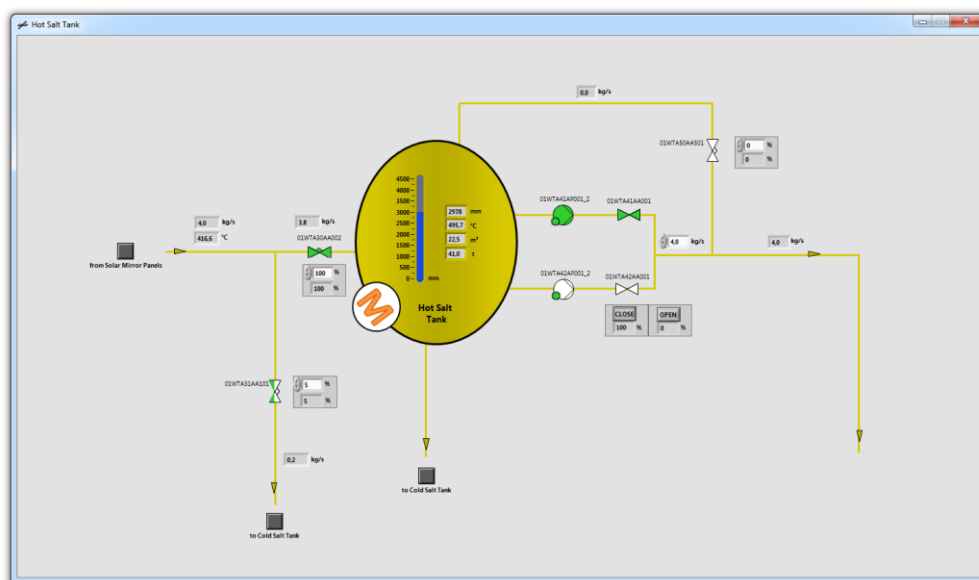


Abbildung 30: Steuerungsansicht *Hot Salt Tank* (Großformat siehe Anhang A3).

Das Fenster *Cold Salt Tank* bildet das Pendant hierzu im Bereich des kalten Salzspeichertanks. Hierin ist zusätzlich die Steuereinheit des Massenstromreglers integriert (siehe Abbildung 31 und Abbildung 33).

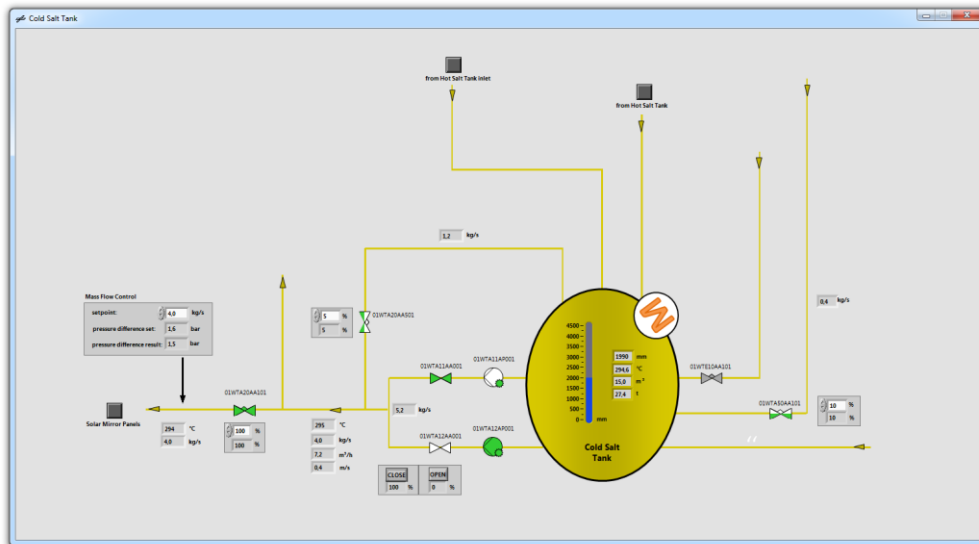


Abbildung 31: Steuerungsansicht *Cold Salt Tank* (Großformat siehe Anhang A3).

Die Steuerung der Kollektoren wird über nachfolgend abgebildete Ansicht *Solar Mirror Panels* gewährleistet, welche darüber hinaus den Drainagetank und die Headerleitungen enthält.

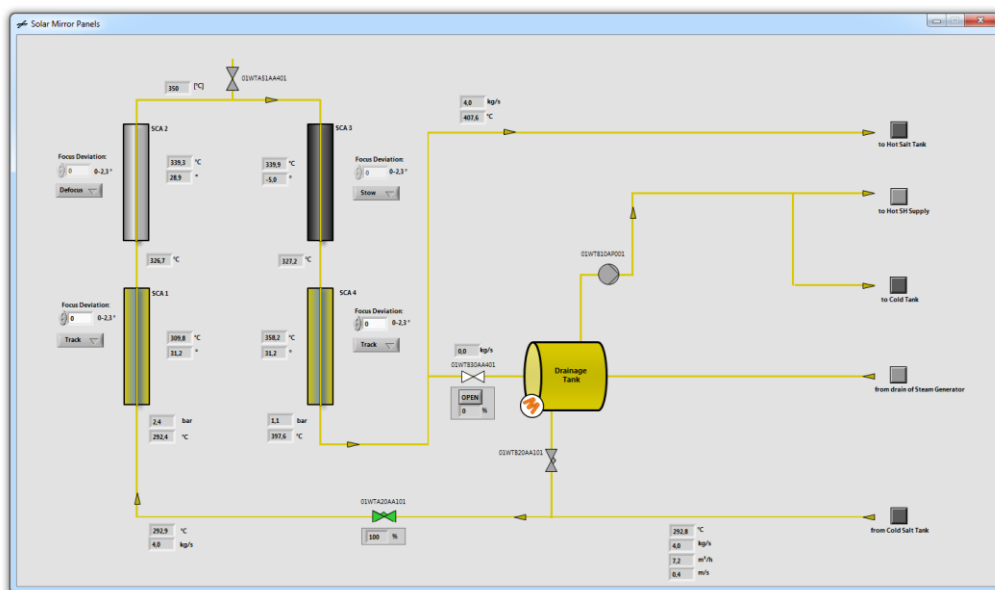


Abbildung 32: Steuerungsansicht *Solar Mirror Panels* (Großformat siehe Anhang A3).

Die Detailansichten *Hot Salt Tank*, *Cold Salt Tank* und *Solar Mirror Panels* sind als Popup-Fenster konfiguriert und können über entsprechende graue Navigations-Buttons von jeder Steuerungsansicht aus aufgerufen werden. Darüber hinaus besitzen die dazugehörigen Fenster eine fest definierte Größe von 1440 x 810 Pixel (16:9 Format) und können beliebig verschoben, auf verschiedene Bildschirme verteilt, minimiert oder geschlossen werden. Das Hauptanwendungsfenster *Overall View* bleibt dabei immer als Vollbild im Hintergrund.

### 4.2.2 Massenstrom-Regler

Die Steuerung des Massenstroms durch das Solarfeld wird über einen implementierten PID-Regler bewerkstelligt. Die Vorgabe des gewünschten Massenstrom-Sollwerts kann der Anwender über eine sich in *Cold Salt Tank* befindliche Steuereinheit vornehmen (siehe Abbildung 33).

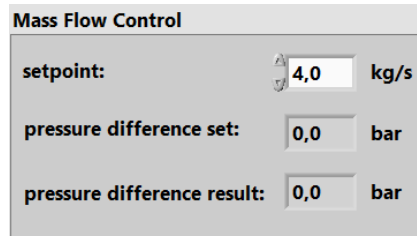


Abbildung 33: Steuereinheit des Massenstromreglers.

Der Regler besitzt als Führungsgröße einen benutzerdefinierten Massenstrom  $m_{\text{set}}$  im Bereich von  $0 \leq m_{\text{set}} [\text{kg/s}] \leq 12$  und bekommt als Regelgröße den aktuellen Massenstrom  $m_{\text{act}}$  des Messpunktes *01WTA20CF001* zurückgeführt (siehe Kapitel 3.1). Anhand der daraus ermittelten Regelabweichung resultiert die Druckdifferenz *pressure difference set* ( $pdiff_{\text{set}}$ ), welche die Stellgröße des Reglers darstellt und auf folgenden Regelparametern basiert:

- Proportionalanteil  $kp = 1$
- Nachstellzeit  $T_i = 3,6 \text{ s}$
- Vorhaltezeit  $T_d = 0,6 \text{ s}$
- Max. Stellgröße (Anti-Windup)  $u_{\text{max}} = 15 \text{ bar}$
- Min. Stellgröße (Anti-Windup)  $u_{\text{min}} = 0 \text{ bar}$

Diese Parameter sind für ein robustes Verhalten des Regelkreises im Simulator eingestellt.<sup>20</sup> Auf den Massenstrom einflussnehmende Ventile sind hierbei als Störgrößen zu betrachten, welche sich mit der Stellgröße *pressure difference set* überlagern und in der Druckdifferenz *pressure difference result* resultieren. Diese Druckdifferenz wird an VSF als Faktor *pdiff* (siehe Kapitel 2.3.2) übergeben. Abbildung 34 soll dieses Regelkonzept verdeutlichen.

---

<sup>20</sup>Eine Optimierung dieser Parameter ist Teil von späteren Arbeiten in Vorbereitung auf die Inbetriebsetzung der realen Anlage.

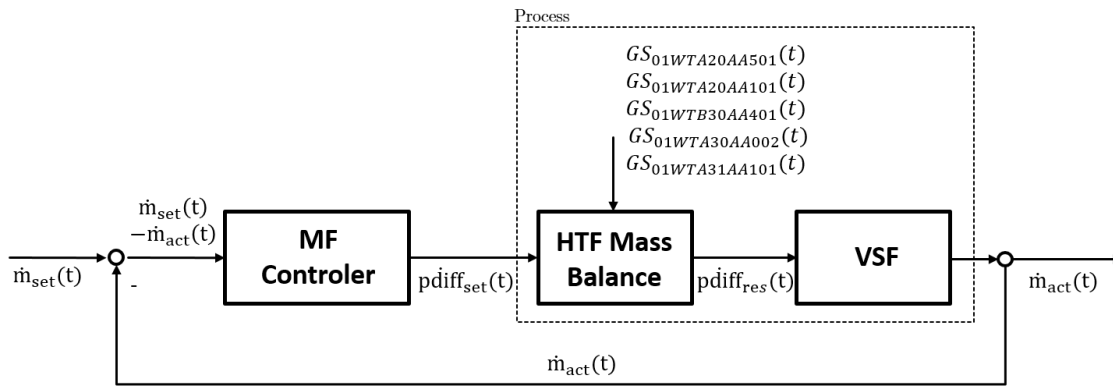


Abbildung 34: Blockschaltbild Massenstrom-Regler.

### 4.2.3 Schutzfunktionen der Kollektoren

Um die Kollektormodule vor Überhitzung und zu hoher Windlast zu schützen, sind in der realen Leittechnik entsprechende Schutzfunktionen hinterlegt. Diese sind in der *Functional Description* [17] [18] [19] definiert und wurden im Rahmen dieser Arbeit in teilweise modifizierter Form in die Software integriert.

#### Übertemperaturschutz

Um die SCAs vor Überhitzung zu schützen, werden diese bei Überschreitung eines definierten Temperaturwertes automatisch defokussiert ( $\Phi_D=2,3^\circ$ ). Dieser Grenzwert kann vom Benutzer im Bereich von 400-580°C im Zuge der Initialisierung vorgegeben werden. Die Voreinstellung liegt hier bei 510°C, was dem Grenzwert der realen Anlage entspricht [19]. Als Referenzwerte werden jeweils die Temperaturen der Messstellen am Ende jedes Kollektors verwendet, da dies die jeweils heißeste Stelle eines fokussierten SCAs darstellt. Erkennt die Leittechnik eine Temperaturüberschreitung an einem Kollektor, wird dieser – unabhängig von Position und aktuellem Modus – direkt in den *Defocus Mode* geschaltet. Der Benutzer wird durch eine Warnmeldung über diesen Vorgang informiert. Die weitere Steuerung der Anlage kann aus Sicherheitsgründen erst nach Bestätigung dieser Warnmeldung fortgeführt werden (siehe Abbildung 35).

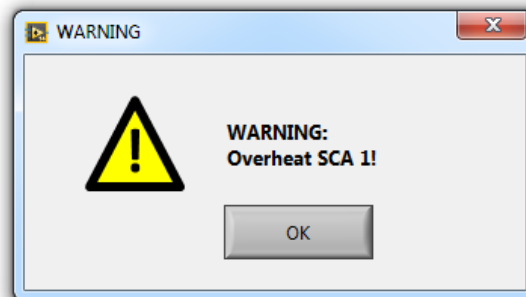


Abbildung 35: Warnmeldung eines Übertemperatureintritts an SCA 2.

Darüber hinaus ist die weitere Bedienung des entsprechenden Kollektors durch den Benutzer gesperrt. Nachdem der Receiver des SCAs abgekühlt ist und der Grenzwert wieder unterschritten wurde, kann der Benutzer den gesperrten Kollektor über die Bestätigung eines Buttons wieder für die Steuerung freigeben (siehe Abbildung 36). Daraufhin kann das SCA vom Benutzer wieder wie gewohnt bedient werden, bleibt jedoch bis zu einem aktiven Eingriff durch den Anwender im *Defocus Mode*.

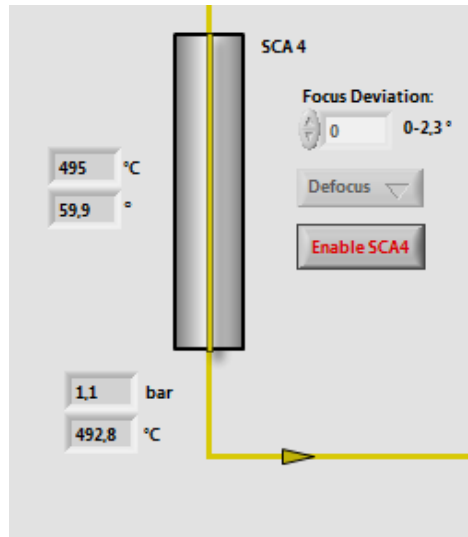


Abbildung 36: Freigabemöglichkeit des SCAs nach einem Übertemperaturszenario.

### Schutz vor zu hoher Windlast

Da die Parabolspiegel eine große Wind-Angriffsfläche besitzen und somit bei Windströmungen starkem Druck ausgesetzt sind, greift im Falle von zu starkem Wind eine in der Steuerungstechnik hinterlegte Schutzfunktion ein. Dies äußert sich dadurch, dass alle Kollektoren – wieder unabhängig von Position und Modus – in die Parkposition gefahren werden, d.h. für sämtliche Kollektoren wird der *Stow-Mode* aktiviert. Wie auch im Falle einer Übertemperatur, erhält auch hier der Benutzer eine nicht-vernachlässigbare Meldung und kann erst nach einem Rückgang der Windgeschwindigkeit die Kollektorsteuerung wieder freigeben.



Abbildung 37: Warnmeldung bei zu hoher Windgeschwindigkeit.

Der Referenzwert für das Auslösen der Schutzfunktion kann vom Benutzer während der Initialisierung im Bereich von 10-20 m/s festgelegt werden. Die Standardeinstellung beträgt hier 15 m/s. In der ersten Umsetzung des Simulators löst die Schutzfunktion aus, sobald ein Messwert den Grenzwert übersteigt. In realen Systemen – wie unter anderem auch der EMSP – wird der Windalarm meist komplexer ermittelt (z.B. erst nach einer gewissen Anzahl von Messwerten in einem bestimmten Zeitraum bzw. nach mehreren Windböen) und ist von Kollektor-Hersteller zu Kollektor-Hersteller unterschiedlich [18].

### 4.3 Elementare Anwendungsfunktionen

Im Folgenden werden weitere grundlegende Programmfunktionen des Simulators beleuchtet. Dabei wird zuerst auf die Initialisierung des *Operation Mode* eingegangen. Anschließend werden die Funktionen *Chart*, *History* und *Save* beschrieben, welche über die Fußzeile des Simulators initiiert werden. Diese Fußzeile beinhaltet zudem die Funktionen *Start/Stop* (der Anlagensimulation) und *End* (des gesamten Simulationsprogramms), auf welche an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden soll.

Eine Auswahl des Simulatormodi findet durch den Benutzer bei Start der Anwendung über das in Abbildung 38 dargestellte Auswahlfenster statt.

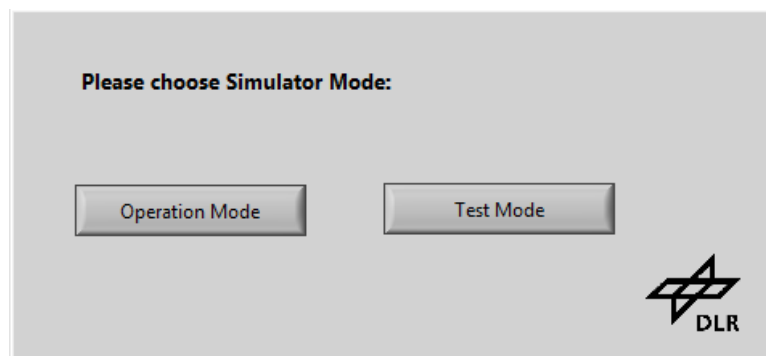


Abbildung 38: Start-Fenster zur Auswahl des Simulatormodi.

### 4.3.1 Initialisierung

Nach Auswahl des *Operation Modes* hat der Anwender die Möglichkeit, eine Initialisierung der Simulation vorzunehmen. Dies geschieht über folgendes Fenster:

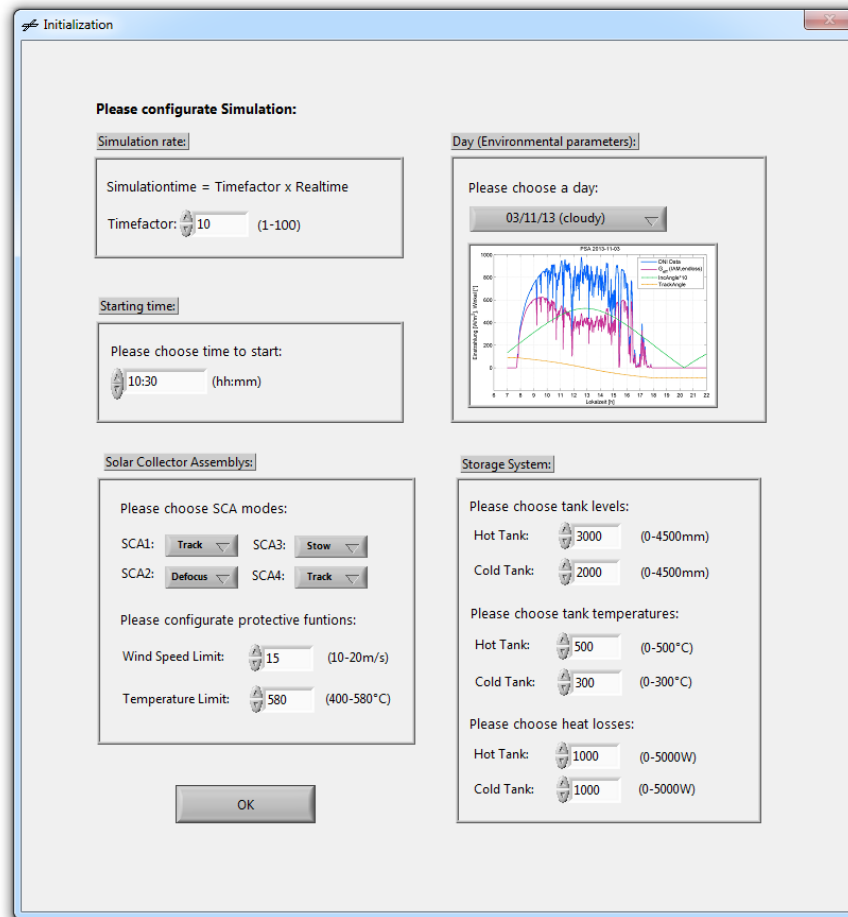


Abbildung 39: Ansicht für die Initialisierung der bevorstehenden Simulation.

Die Konfigurationsmöglichkeiten sind dabei in fünf Blöcke aufgeteilt, welche nachfolgend grob skizziert werden sollen.

*Simulation rate:*

- Auswahl der Simulationsgeschwindigkeit.

*Starting time:*

- Auswahl der Simulations-Uhrzeit, an welcher die Simulation beginnen soll.

*Solar Collector Assemblys:*

- Wahl der Betriebsmodi der Kollektoren zu Simulationsstart.
- Konfiguration der Schutzfunktionen: Festlegung der Referenzwerte für Wind- und Temperaturalarm.



*Day (Environmental parameters):*

- Auswahl der Tagesverlaufsparameter. Dem Benutzer stehen sechs verschiedene vordefinierte Tage sowie ein Listeneintrag namens *user defined* zur Verfügung. Bei Auswahl eines Listeneintrags werden die jeweils hinterlegten Solarfeld-Daten grafisch angezeigt.

*Storage System:*

- Initialisierung der Speichertanks über Temperatur- und Füllstandwerte.
- Festlegung der konstanten Wärmeverluste.

### 4.3.2 Anzeigen von Daten

Zur Analyse wesentlicher Simulationsverlaufsdaten stehen dem Anwender zwei verschiedene Funktionen zur Verfügung, die Anzeige der Signalverläufe in einem Graph (*Chart*) oder das Anzeigen vergangener Werte in Tabellenform (*History*). Beide Funktionen können über die Fußzeile aufgerufen werden (siehe Abbildung 29) und stellen die Daten der letzten drei Stunden (Simulationszeit) zur Verfügung, was 10.800 Zeitwerten ( $\Delta t=1s$ ) entspricht. Ebenfalls über die Fußzeile kann auch der geforderte *Freeze Mode* aktiviert werden (siehe Kapitel 3.2.1). Der *Freeze Mode* stoppt trotz laufender Simulation die Aufnahme von Daten sowohl im Graph, als auch in der Tabelle, was dem Benutzer eine vereinfachte Handhabung der Analysetools gewährleisten soll. Diese implementierte Funktion verhindert unter anderem die mit den Zeitschritten verknüpfte Aktualisierung des Graphen und somit auch das damit einhergehende kontinuierliche Rücksetzen der Zoom-Funktion. Die indessen anfallenden Daten werden in einem Datenpuffer zwischengespeichert und nach Beenden des *Freeze Modes* (Rücksprung in *Live Stream*) in Graph und Historientabelle übernommen.

Durch Aufruf der Anzeigefunktion *Chart* über die Fußzeile des Simulators, gelangt der Benutzer zu der in Abbildung 41 dargestellten Ansicht.

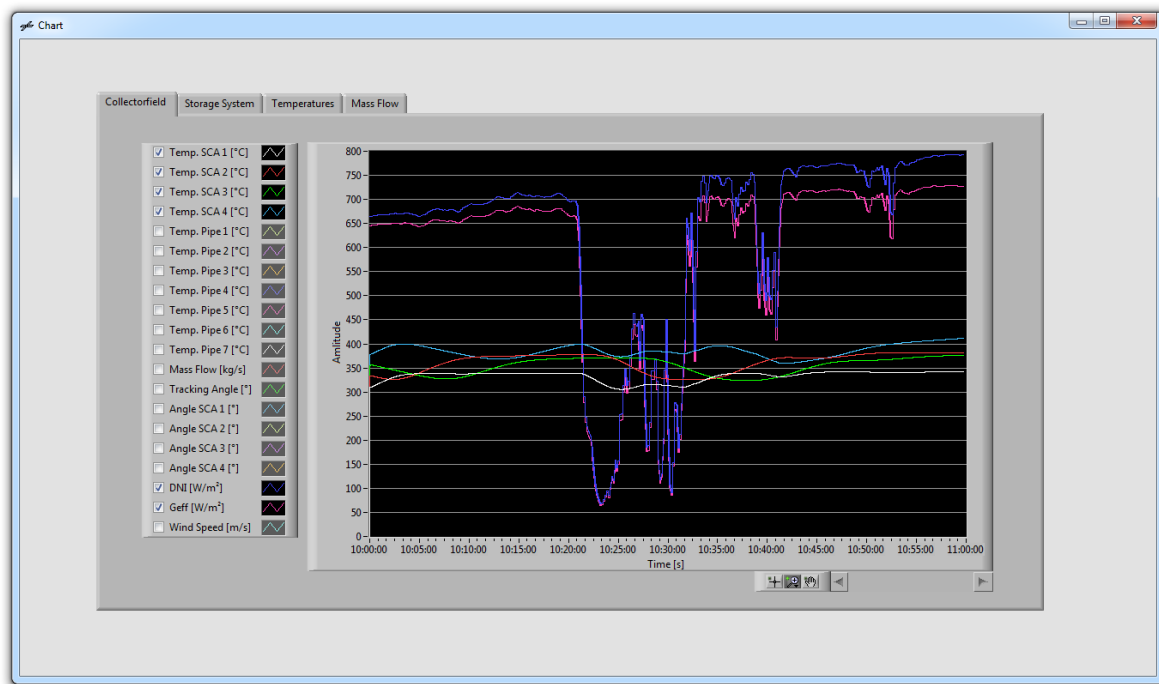


Abbildung 40: Anwendungsfenster *Chart* zur Anzeige von Signalverläufen.

In diesem Anwendungsfenster stehen vier Verlaufsdiagramme zur Verfügung, welche die Signalverläufe in folgende Bereiche gegliedert enthalten:

- *Collectorfield*
- *Storage System*
- *Temperatures*
- *Mass Flow*

In jedem Teilbereich kann der Benutzer aus einer Reihe anzuzeigender Daten wählen. Die Y-Achse wird entsprechend der getroffenen Auswahl automatisch skaliert.

Der Aufruf von *History* bringt das in Abbildung 41 dargestellte Fenster zum Vorschein.

	10:30:00	10:30:01	10:30:02	10:30:03	10:30:04	10:30:05	10:30:06	10:30:07	10:30:08	10:30:09	10:30:10	10:30:11	10:30:12	10:30:13	10:30:14	Time
0	0	309,47	309,43	309,42	309,44	309,49	309,55	309,63	309,71	309,81	309,91	310,01	310,12	310,24	310,36	Temp. SCA 1 [°C]
0	0	332,45	332,39	332,35	332,37	332,43	332,5	332,56	332,62	332,68	332,71	332,74	332,74	332,73	332,7	Temp. SCA 2 [°C]
0	0	355,43	355,37	355,33	355,33	355,34	355,36	355,39	355,42	355,46	355,48	355,52	355,56	355,57	355,56	Temp. SCA 3 [°C]
0	0	378,41	378,35	378,32	378,32	378,35	378,38	378,44	378,5	378,58	378,66	378,75	378,85	378,95	379,05	Temp. SCA 4 [°C]
0	0	300	299,99	299,98	299,97	299,96	299,96	299,95	299,94	299,93	299,92	299,91	299,9	299,89	299,89	Temp. Pipe 1 [°C]
0	0	299,99	299,98	299,97	299,95	299,94	299,93	299,92	299,91	299,9	299,89	299,88	299,87	299,86	299,84	Temp. Pipe 2 [°C]
0	0	320,96	320,92	320,91	320,94	320,99	321,06	321,13	321,22	321,32	321,42	321,53	321,64	321,75	321,87	Temp. Pipe 3 [°C]
0	0	343,94	343,88	343,84	343,83	343,84	343,89	343,99	344,07	344,13	344,18	344,21	344,22	344,21	344,19	Temp. Pipe 4 [°C]
0	0	366,92	366,86	366,83	366,82	366,84	366,86	366,89	366,93	366,96	366,98	367	367	366,99	366,97	Temp. Pipe 5 [°C]
0	0	389,9	389,84	389,81	389,82	389,84	389,88	389,94	390	390,08	390,16	390,25	390,35	390,45	390,56	Temp. Pipe 6 [°C]
0	0	389,98	389,97	389,95	389,93	389,92	389,9	389,88	389,86	389,85	389,83	389,81	389,8	389,78	389,76	Temp. Pipe 7 [°C]
0	4,91	4,71	4,52	4,34	4,16	4,01	3,88	3,77	3,69	3,63	3,59	3,56	3,56	3,56	3,56	Mass Flow [kg/s]
27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	Tracking Angle [°]
0	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	Angle SCA 1 [°]
0	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	Angle SCA 2 [°]
0	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	Angle SCA 3 [°]
0	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	Angle SCA 4 [°]
901,7	901,7	901,7	901,7	901,7	901,7	901,7	901,7	901,7	901,9	901,9	901,9	901,9	901,9	901,9	901,9	DNI [W/m²]
531,04	531,04	531,04	531,04	531,04	531,04	531,04	531,04	531,04	531,04	530,83	530,83	530,83	530,83	530,83	530,83	Geff [W/m²]
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Wind Speed [°]

Abbildung 41: Anwendungsfenster *History* zur Anzeige von Messdaten in tabellarischer Form.

Die Anzeige der Daten findet hier in analoger Struktur zum Ansichtsfenster *Chart* statt. Diese Darstellungsform ermöglicht ein exaktes Auslesen der Messwerte.

### 4.3.3 Abspeichern von Daten

Auch das Abspeichern von Daten wird über die Fußzeile ausgeführt. Sämtliche in den Graphen und somit auch in den Historientabellen enthaltene Daten stehen hierbei zur Verfügung. Die in *.csv-files* abzuspeichernden Datensätze können vom Benutzer aus den Bereichen *Collectorfield*, *Storage System*, *Temperatures* und *Mass Flow* im nachfolgend dargestellten Auswahlfenster *Save Data* selektiert werden.

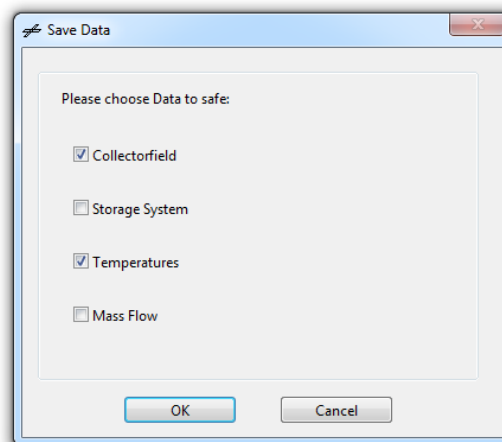


Abbildung 42: Auswahlfenster der abzuspeichernden Datensätze.

## 4.4 Test Mode

Der *Test Mode* ist eine vereinfachte Version des Simulators, welche auf das Solarfeld beschränkt ist. Nach Wahl der Simulationsgeschwindigkeit (Initialisierung des *Test Modes*, Details siehe Anhang A4) hat der Anwender die Möglichkeit, sich ein umfangreiches Verständnis über das Verhalten des Solarfeldes in Abhängigkeit verschiedener Parameter anzueignen. Die implementierten Parameter entsprechen hierbei den Eingangsparametern des Solarfeldmodells VSF und können im Laufe der Simulation kontinuierlich variiert werden. Dies ist über die in Abbildung 43 dargestellte Eingabemaske möglich.

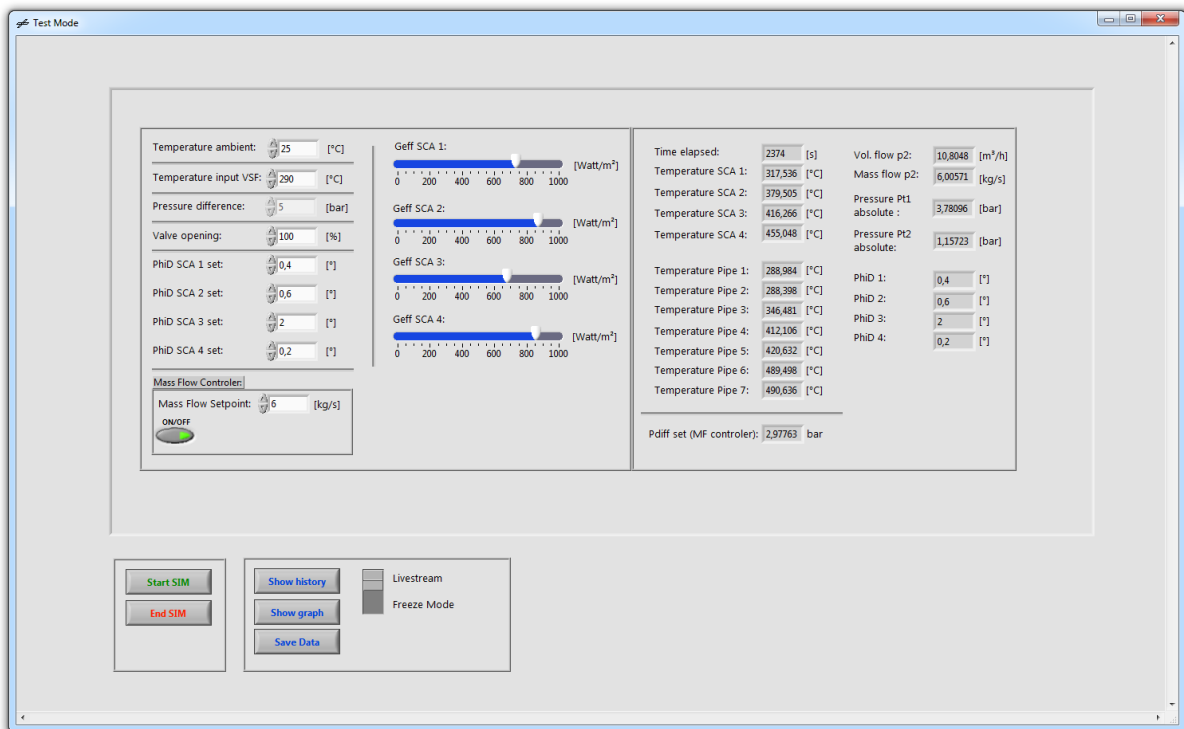


Abbildung 43: Human Machine Interface des *Test Modes*.

Darüber hinaus ist auch in diesem Betriebsmodus des Simulators ein Massenstromregler integriert, welcher zudem auf Wunsch deaktiviert werden kann und somit eine manuelle Vorgabe der Druckdifferenz  $p_{diff}$  über das Solarfeld ermöglicht.

Auch die im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Funktionen für die Anzeige und das Abspeichern von Daten sowie der *Freeze Mode* sind hier vorhanden. Diese Funktionen sind analog zum *Operation Mode* implementiert, weshalb an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen wird (Detail siehe Anhang A4).

## 5 Ergebnis und Anwendungsbeispiele

Das Ergebnis dieser Arbeit ist eine einfach zu bedienende Software für die Simulation des Solarfeld- und Speicherbetriebs der, sich in Portugal im Aufbau befindenden solarthermischen Parabolrinnenanlage *Évora Molten Salt Platform*. Der entstandene Simulator erlaubt dem Benutzer das Verhalten der nachgebildeten Pilotanlage unter verschiedenen Rahmenbedingungen und Umwelteinflüssen kennenzulernen. Hierfür können reale Messdaten eingelesen und für die Simulation eines vollständigen Tagesverlaufs verwendet werden. Sowohl der Startzeitpunkt und die Geschwindigkeit der Simulation, als auch die Anfangszustände diverser Komponenten können vom Benutzer in einem gewissen Bereich vorgegeben werden. Die einzelnen Anlagenbestandteile sind auf mehrere Teilmodelle aufgeteilt, welche je nach Anforderung und Relevanz einen unterschiedlich hohen Detaillierungsgrad besitzen. Die Steuerung der Anlage erfolgt über eine der realen Leitwarte angenäherte Bedienoberfläche, welche zudem die Anzeige von Signalverläufen und Verlaufsdaten sowie das Speichern von Datensätzen erlaubt. Darüber hinaus sind bereits ein Teil der in der *Functional Description* [17] [18] [19] beschriebenen Anlagenfunktionen in die Leitechnik integriert, wie zum Beispiel die Schutzfunktionen der Kollektoren. Darüber hinaus besitzt die Simulationssoftware einen sogenannten *Test Mode*, welcher einen Überblick über die für das Solarfeld relevanten Parameter und deren Einfluss ermöglicht.

Der Simulator kann damit zur Schulung des zukünftigen Betriebspersonals der Anlage verwendet werden und erlaubt das Nachbilden einer Reihe möglicher Szenarien. Nachfolgend sollen die Anwendungsmöglichkeiten des Simulators anhand zweier beispielhafter Szenarien aufgezeigt werden.

## 5.1 Szenario 1: Durchzug von Wolken

Dieses Szenario soll den Einfluss von Wolken auf das Solarfeld verdeutlichen. Hierfür werden die Messdaten der PSA des 12.09.2013 verwendet. Abbildung 44 zeigt einen Ausschnitt dieser Daten.

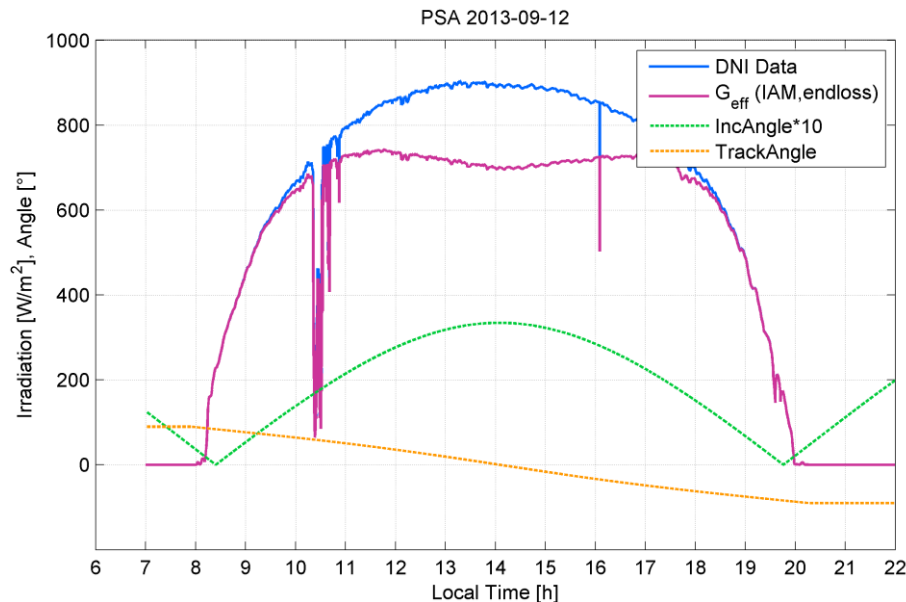


Abbildung 44: Auszug aus Tagesverlaufsdaten des 12.09.2013.

Das Schaubild zeigt den Tagesverlauf der Sonnenstrahlung in Almería vom 12.09.2013 von 07-22 Uhr, sowie die daraus resultierende effektive Einstrahlung  $G_{\text{eff}}$ . Darüber hinaus werden der Einfallswinkel (Incidence Angle) der Sonne relativ zur Kollektorausrichtung sowie der optimale *Track-Winkel*  $\Phi_{\text{track}}$  dargestellt. Am Verlauf der Sonnenstrahlung ist ein erheblicher Strahlungseinbruch in der Zeit von 10:20-10:32 Uhr zu erkennen, was auf einen Durchzug von Wolken über das Solarfeld zurückzuführen ist.

Um das simulierte Verhalten des Solarfeldes auf solch einen Einstrahlungseinbruch darzustellen, wird als Startzeit der Simulation 10:00 Uhr, mit einer Simulationsgeschwindigkeit 10-mal schneller Echtzeit gewählt. Des Weiteren werden folgende Ausgangszustände definiert:

### Kollektoren:

Modus SCA 1-4: *Track*  
 Max. Temperatur:  $580^{\circ}\text{C}$   
 Max. Windgeschwindigkeit:  $15 \text{ m/s}$

### Speichertanks:

Füllstand heißer Tank:  $2000 \text{ mm}$   
 Füllstand kalter Tank:  $2000 \text{ mm}$   
 Temperatur heißer Tank:  $500^{\circ}\text{C}$   
 Temperatur kalter Tank:  $300^{\circ}\text{C}$

Für den Massenstrom durch das Solarfeld ist ein Wert von 8 kg/s bei einer dem Normalbetrieb entsprechenden Öffnung aller Ventile eingestellt.

Daraus resultiert nach einem simulierten Zeitraum von ca. einer Stunde (entspricht ca. fünf Minuten Echtzeit) folgender Temperaturverlauf der Kollektoren:

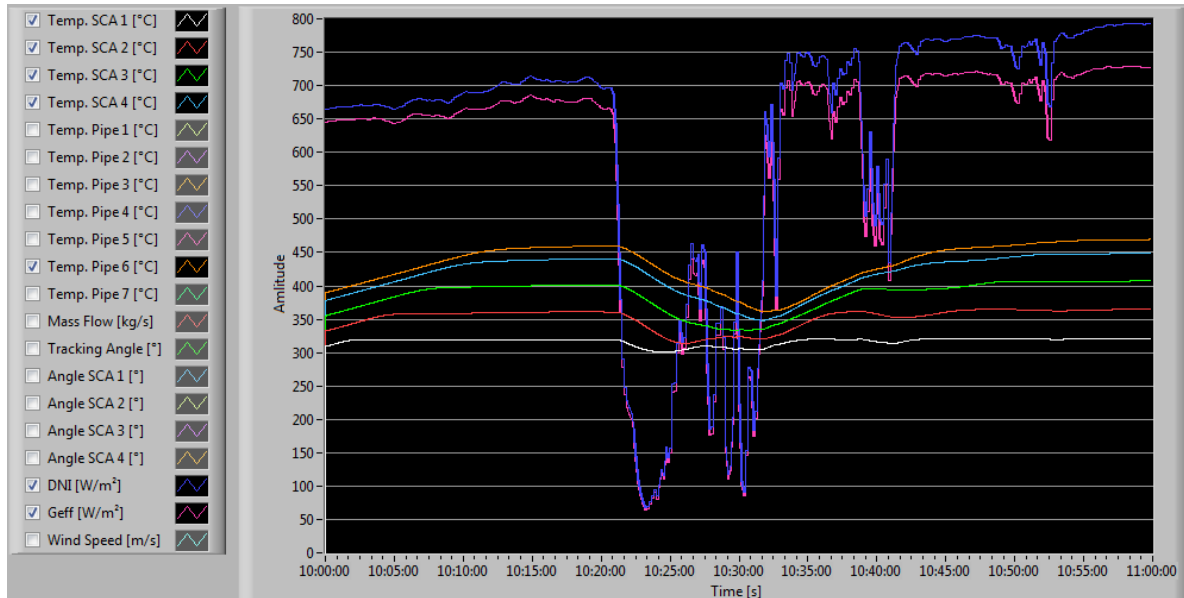


Abbildung 45: Temperaturverlauf der Kollektoren beim Durchzug von Wolken.

Trotz einer relativ konstanten effektiven Einstrahlung im Bereich von 650-675 W/m<sup>2</sup> ist am Temperaturverlauf der Kollektoren eine gewisse Einschwingdauer des Systems zu erkennen (ca. 10 bis 20 min zu Simulationsbeginn). Diese ist auf die vorgegebenen Initialisierungswerte sowie die Trägheit des Solarfelds zurückzuführen. Am Ende dieser Einschwingphase erreichen die SCAs (Kollektormitte) folgende quasistationäre Werte:

SCA 1: 320°C

SCA 2: 361°C

SCA 3: 402°C

SCA 4: 441°C

Die Temperatur des Fluids am Solarfeldausgang (Messstelle 01WTF10CT008, Temperature Pipe 6) beträgt 460°C.

Während der Zeit des Wolkendurchzugs (von ca. 10:22-10:32 Uhr) ist bei einem konstant gehaltenen Massenstrom ein stetiger Rückgang sämtlicher Temperaturen zu erkennen. Das Temperaturminimum der Kollektoren sowie des Salzes am Solarfeldausgang liegt hier jeweils bei folgenden Werten:

SCA 1: 300°C

SCA 2: 315°C

SCA 3: 333°C

SCA 4: 350°C

Pipe 6: 360°C

Nach erfolgreichem Durchzug der Wolken (10:32 Uhr) steigen die Einstrahlungswerte und schließlich auch die Temperaturen der Kollektoren und des Wärmeträgermediums am Kollektorfeldaustritt wieder an.

Die Simulation dieses Szenarios verdeutlicht, dass der Durchzug von Wolken einen signifikanten Einfluss auf das Solarfeld hat. Eine Abschattungsdauer von 17 Minuten führt in dieser Konfiguration zu einem maximalen Temperaturabfall des Salzes am Solarfeldausgang von ca. 90°C. Dies macht die Notwendigkeit eines Temperaturreglers, welcher als Regelgröße die Ausgangstemperatur des Solarfeldes und als Stellgröße den Massenstrom durch das Solarfeld besitzt, deutlich. Entsprechende Regelalgorithmen für die reale Anlage befinden sich derzeit in der Entwicklung. Darüber hinaus lässt sich an der Reaktionszeit des Solarfeldes auf den Strahlungseinbruch die Trägheit des Systems erkennen.

## 5.2 Szenario 2: Übertemperaturalarm an SCA 4

Dieses Szenario soll die Funktion des Übertemperaturschutzes darstellen. Um für einen längeren Zeitraum eine konstant hohe Einstrahlung zu erhalten, ist es sinnvoll einen wolkenlosen Sommertag für die Simulation heranzuziehen, um eine hohe Einstrahlung in Verbindung mit einem hohen Sonnenwinkel zu erreichen (Details hierzu siehe [29]). Hierfür sind die Tagesverlaufsdaten des Datensatzes vom 06.01.2013 prädestiniert.

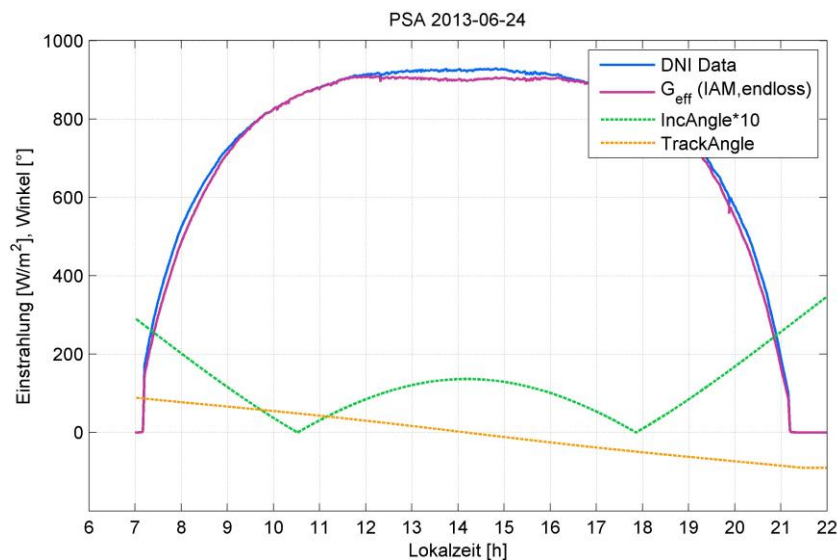


Abbildung 46: Auszug aus Tagesverlaufsdaten (Datensatz 2013-06-24).



Abbildung 46 stellt unter anderem die effektive Einstrahlung dieses Datensatzes da. Wie man am Verlauf des lilafarbenen Graphen erkennen kann, ist eine relativ konstante, effektive Einstrahlung von ca. 900 Watt/m<sup>2</sup> zwischen 11:30 Uhr und 16:30 Uhr gegeben.

Aufgrund dessen wird der Start der Simulation auf 12:00 Uhr festgelegt. Die Simulationsgeschwindigkeit ist auf 10-fache Echtzeit eingestellt. Das Temperaturlimit der Kollektoren ist für dieses Szenario auf 510°C heruntergesetzt.

Die weiteren Ausgangszustände lauten:

Kollektoren:

Modus SCA 1-4:            *Track*  
Max. Temperatur:        510°C  
Max. Windgeschwindigkeit: *15 m/s*

Speichertanks:

Füllstand heißer Tank:    2000 mm  
Füllstand kalter Tank:     *2000 mm*  
Temperatur heißer Tank:   500°C  
Temperatur kalter Tank:    *300°C*

Der Massenstrom-Sollwert beträgt 6 kg/s, bei einer dem Normalbetrieb entsprechenden Öffnung der Ventile.

Abbildung 47 zeigt den Verlauf der Temperaturen an den Messstellen am Ende jedes Kollektors, über einen simulierten Zeitraum von ca. einer Stunde (entspricht ca. fünf Minuten Echtzeit).

Alle vier Kollektoren haben zu Beginn der Simulation einen starken Anstieg ihrer Temperaturen zu verzeichnen, was auf eine sehr hohe effektive Einstrahlung bei vergleichsweise geringem Massenstrom zurückzuführen ist. Bei konstant gering gehaltenem Massenstrom wird daher schon um 12:09 Uhr das Temperaturlimit von 510°C an SCA 4 erreicht, was zu einem Temperaturalarm in der Leittechnik führt. Kollektor Nummer Vier wird daraufhin automatisch defokussiert, was Abbildung 48 veranschaulichen soll.

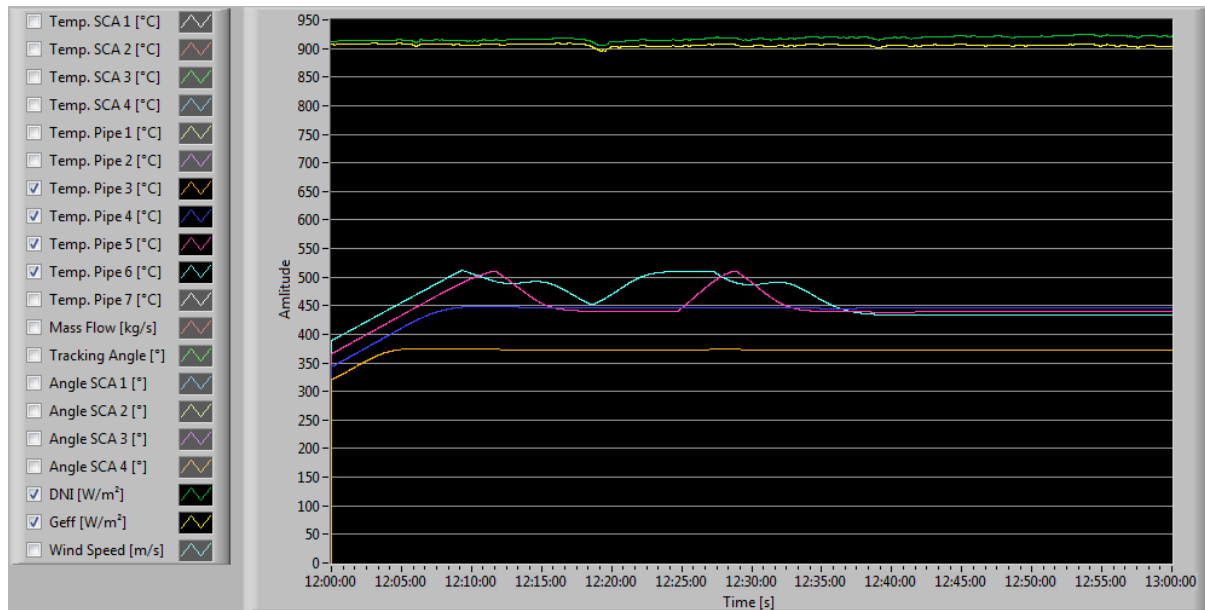


Abbildung 47: Temperaturverlauf der Kollektoren bei einer konstanten effektiven Einstrahlung von ca.  $900 \text{ W/m}^2$ .

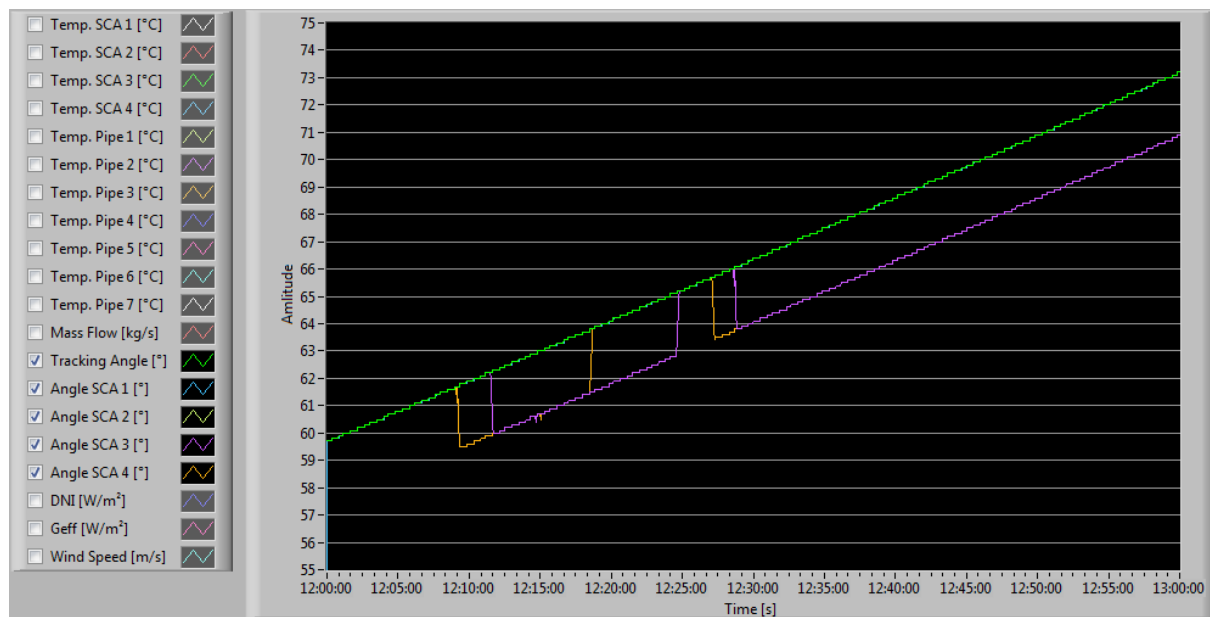


Abbildung 48: Stellwinkel  $\Phi$  der SCAs 1 bis 4 in Abhängigkeit der Zeit.

Die grüne Kennlinie in Abbildung 48 stellt den optimalen *Track-Winkel* der Kollektoren da. Dieser beträgt um 12:09 Uhr ca.  $61,6^\circ$ . Nach Eintritt des Übertemperaturalarms, gibt die Steuerung dem Stellmotor von SCA 4 eine Winkelabweichung  $\Phi_{D\_SCA4}$  von  $2,3^\circ$  vor. Dieser positioniert daraufhin den Kollektor mit einer Geschwindigkeit von  $0,2^\circ/\text{s}$  neu. Mit etwas zeitlicher Verzögerung beträgt die neue Winkelposition von SCA 4 schließlich  $\Phi_{SCA4} = 61,7^\circ - 2,3^\circ = 59,3^\circ$ . Dies ist an der gelben Kennlinie zum Zeitpunkt 12:09 Uhr abzulesen. Darüber hinaus ist die Steuereinheit des Kollektors bis zu einem Temperaturrückgang unter den Grenzwert für den Benutzer gesperrt.

Wenige Minuten später (12:13 Uhr) erreicht auch SCA 3 (*Temperature Pipe 5*) die Temperaturobergrenze (siehe Abbildung 47). Auch dieses Kollektormodul wird daraufhin von der Steuerung automatisch defokussiert, was an der lilafarbenen Kennlinie in Abbildung 48 zu erkennen ist.

Nach einer Bestätigung des jeweiligen Temperaturalarms seitens des Anlagenbedieners und einer entsprechenden Abkühlung der Kollektoren, zeigt sich dem Benutzer schließlich der in Abbildung 49 dargestellte Ausschnitt der Steuerungsansicht *Solar Mirror Panels*.

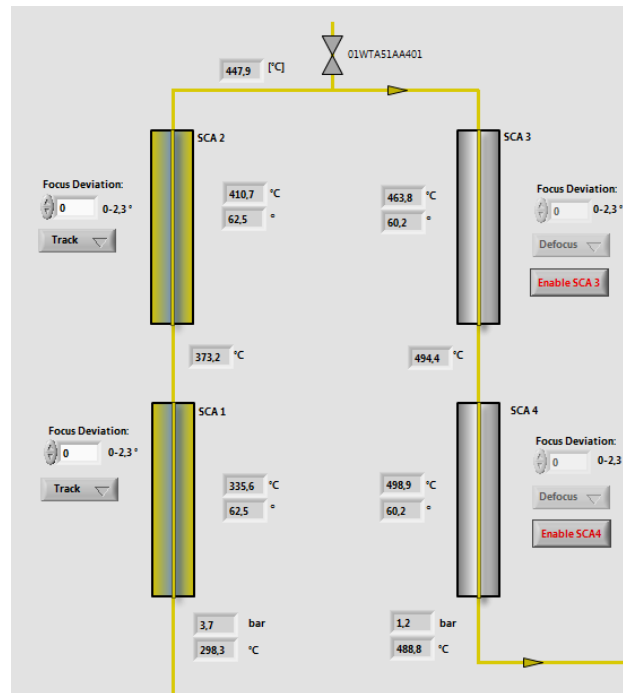


Abbildung 49: Steuerungsansicht *Solar Mirror Panels* nach Auslösen des Übertemperaturschutzes und erfolgter Abkühlung der SCAs.

Der Anwender hat nun die Möglichkeit, die defokussierten Kollektoren wieder für die Steuerung freizugeben, um diese gegebenenfalls wieder fokussieren zu können. In der Simulation werden SCA 4 um 12:17 Uhr sowie SCA 3 um 12:24 Uhr durch den Benutzer erneut in den Fokus gefahren, was wenig später zu einem wiederholten Auslösen des Übertemperaturschutzes führt und die Defokussierung des jeweiligen Kollektors zur Konsequenz hat (siehe Abbildung 48, ab 12:17 Uhr).



## 6 Schlussbetrachtung

Die vorliegende Arbeit beschäftigte sich mit der Entwicklung eines Trainingssimulators für den Solarfeld- und Speicherbetrieb eines solarthermischen Parabolrinnenkraftwerks, welcher für die Schulung des Betriebspersonals der Pilotanlage *Évora Molten Salt Platform* in Portugal genutzt werden soll.

In diesem Kapitel wird erläutert, welche Aspekte des geforderten Funktionsumfangs im Simulator umgesetzt werden konnten und welche Restriktionen die entstandene Simulationssoftware birgt. Darüber hinaus wird ein Ausblick auf mögliche Erweiterungen des Systems gegeben.

### 6.1 Diskussion

Wie einleitend in dieser Bachelorarbeit beschrieben, soll für das Training des Bedienpersonals ein Tool bereitstehen, welches es den Ingenieuren und Technikern ermöglicht, sich ein prinzipielles Verständnis über das Verhalten der Anlage, speziell in Bezug auf das Solarfeld- und Speichersystem, anzueignen.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte hierfür eine Simulationssoftware entwickelt werden, welche es dem Benutzer ermöglicht den Normalbetrieb der Anlage auf Basis von realen Umgebungsparametern und mit einer dem Leitsystem nachempfundenen Bedienoberfläche nachzubilden. Dabei ist das System auf das Solarfeld und das Speichersystem der Pilotanlage begrenzt. Das Solarfeld wird detailliert über das dynamische Virtual Solar Field Modell abgebildet und an den Simulator gekoppelt. Abgesehen von den Pumpen konnten alle für diesen Teil der Anlage relevanten Komponenten modelliert und in Software umgesetzt werden. Der Fokus der Entwicklung lag dabei auf dem Solarfeld und dessen Haupt-Salzkreislauf (Kalter Tank  $\rightarrow$  Solarfeld  $\rightarrow$  Heißer Tank). Dieser Teilbereich spiegelt ein sehr realitätsnahes Anlagenverhalten wieder. Die „Dampferzeugerseite“ (Heißer Tank  $\rightarrow$  Dampferzeuger  $\rightarrow$  Kalter Tank) erhielt hingegen einen wesentlich geringeren Detaillierungsgrad und basiert auf einer Vielzahl von Vereinfachungen. Die erfolgte elementare Umsetzung auch dieses Anlagenbereichs gewährleistet dem Benutzer jedoch das Betreiben des ganzheitlichen Systems, welches mit dem Wärmeträgermedium Salz in Verbindung steht. Nur ein

Teilbereich des Salz-Drainage-Systems (Drainage Tank → Dampferzeuger → Kalter Tank) wurde ohne Funktion abgebildet.

Im weiteren Verlauf der Arbeit entstand darüber hinaus eine Leittechnik für das implementierte Anlagenmodell, welche bereits erste Teile der *Functional Description* [17] [18] [19] enthält und dem Benutzer damit das Durchspielen verschiedener Szenarien ermöglicht. Die zugehörige Benutzeroberfläche orientiert sich in den umgesetzten Bereichen stark am Bedienkonzept von SIEMENS®, was dem Anwender eine gute erste Übersicht über das Steuerungskonzept der künftigen realen Leitwarte ermöglicht. Darüber hinaus beinhaltet die entwickelte Software in Bezug auf Simulationssteuerung und Datenhandling eine Reihe von Funktionen, welche dem Anwender eine umfangreiche Analyse des Anlagenverhaltens gewährleisten.

Erste Tests zeigten, dass der Simulator eine sehr realitätsnahe Nachbildung des Anlagenverhaltens zulässt und somit in seiner jetzigen Form bereits für eine Schulung einsetzbar ist. Durch Tests von neuen Regelungen und Bedienelementen, welche aus Sicherheitsaspekten an der realen Anlage nicht getestet werden können, kann der Simulator zu einer Verbesserung des Leitsystems beitragen. Zudem erlaubt dieser bereits vor der Inbetriebnahme der Anlage einen Test der geplanten Steuerung und ermöglicht damit eine Optimierung der *Functional Description* [17] [18] [19]. Der Simulator leistet daher nicht nur einen wichtigen Beitrag für das zu schulende Bedienpersonal, sondern auch für die beteiligten Entwicklungsingenieure.

## 6.2 Ausblick

Bei der Implementierung wurde großer Wert auf die Erweiterbarkeit des Systems gelegt. Durch die Modularität und Struktur der entstandenen Software sowie der vorliegenden Beschreibung, bildet der Simulator einen geeigneten Rahmen für sämtliche Weiterentwicklungen.

Aufgrund der Vielzahl von Erweiterungsmöglichkeiten soll an dieser Stelle keine detaillierte Beschreibung der einzelnen Ansätze vorgenommen werden. Als sinnvoll erachtete, nachfolgende Entwicklungsschritte sind hierbei jedoch die Implementierung der Pumpenfunktionalitäten sowie die Umsetzung der Betriebsmodi für eine automatisierte Fahrweise der Anlage zu nennen. Darüber hinaus könnten salzspezifische Sicherheitsfunktionen und -alarme sowie künftige Regelkonzepte implementiert und den Benutzern zum Test zur Verfügung gestellt werden.

Eine Übersicht über sämtliche gewünschten Funktionalitäten und Anforderungen an die zukünftige Simulationssoftware ist im *Product Backlog* [20] zu finden, an welchem sich die Weiterentwicklung des Simulators orientieren wird.





# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematische Darstellung von Parabolrinnen-Kollektoren [9].....	2
Abbildung 2:	Aufbau eines mit Salzschnelze arbeitenden, solarthermischen Parabolrinnenkraftwerks (nach [10]). .....	8
Abbildung 3:	Stand EMSP (2012) [16].....	9
Abbildung 4:	Grundkonzept Aufbau EMSP (nach [10], [16]).....	10
Abbildung 5:	Vereinfachtes Schema des Simulationstools VSF [27].....	12
Abbildung 6:	In VSF realisierter Teil der Évora Molten Salt Platform. ....	13
Abbildung 7:	Skizze des Track- und Stellwinkels eines Kollektors (nach [29]). ....	15
Abbildung 8:	Kommunikationsstruktur von VSF und dem späteren Simulator.....	16
Abbildung 9:	Schema der zu simulierenden Anlage (nach P&ID [21]). ....	21
Abbildung 10:	Vereinfachtes Schema des Simulators.....	28
Abbildung 11:	Vereinfachtes Schema der Ablaufsteuerung.....	30
Abbildung 12:	Stark vereinfachtes Programmablaufschaema der Simulationssoftware. ....	31
Abbildung 13:	Fenster-Struktur der Bedienoberfläche.....	34
Abbildung 14:	Blockdiagramm des VIs "operation_mode". ....	36
Abbildung 15:	Auszug aus Tagesverlaufsdaten (Datensatz 2013-01-06).....	37
Abbildung 16:	Skizze der Kollektor-Parkposition. ....	38
Abbildung 17:	Definition des Fokussier-Winkels $\Phi_{\text{track}}$ .....	38
Abbildung 18:	Fokus des Kollektors in Bezug auf die Fokussierabweichung $\Phi_D$ (Näherung, nach [30]).....	39
Abbildung 19:	Skizze der möglichen Fokussierabweichung eines SCAs.....	39
Abbildung 20:	Fokussierabweichung $\Phi_D$ im Defocus-Mode. ....	40
Abbildung 21:	Schema eines Zwei-Tank-Speichersystems [32]. ....	41
Abbildung 22:	Visualisierung des heißen Salztanks.....	44

Abbildung 23: Darstellung des kalten Salztanks in ColdSaltTank.....	45
Abbildung 24: Massenstrom durch das Solarfeld in Abhängigkeit von $p_{diff}$ (vereinfachte Trendlinie).....	48
Abbildung 25: Einfluss des Ventils Bypass CT auf $p_{diff}$ . ....	49
Abbildung 26: Volumenstrom Bypass/Volumenstrom SF in Abhängigkeit von $GS_{BypassCT}$ . ....	49
Abbildung 27: Vereinfacht dargestellte Logikschaltung zur Ermittlung von GS1.....	50
Abbildung 28: Visualisierung des Dampferzeugersystems. ....	52
Abbildung 29: Steuerungsansicht Overall View (Für Großformat siehe Anhang A3). ....	54
Abbildung 30: Steuerungsansicht Hot Salt Tank (Großformat siehe Anhang A3). ....	54
Abbildung 31: Steuerungsansicht Cold Salt Tank (Großformat siehe Anhang A3).....	55
Abbildung 32: Steuerungsansicht Solar Mirror Panels (Großformat siehe Anhang A3). ..	55
Abbildung 33: Steuereinheit des Massenstromreglers.....	56
Abbildung 34: Blockschaltbild Massenstrom-Regler. ....	57
Abbildung 35: Warnmeldung eines Übertemperatureintritts an SCA 2.....	57
Abbildung 36: Freigabemöglichkeit des SCAs nach einem Übertemperaturszenario.....	58
Abbildung 37: Warnmeldung bei zu hoher Windgeschwindigkeit. ....	58
Abbildung 38: Start-Fenster zur Auswahl des Simulatormodi. ....	59
Abbildung 39: Ansicht für die Initialisierung der bevorstehenden Simulation. ....	60
Abbildung 40: Anwendungsfenster Chart zur Anzeige von Signalverläufen.....	62
Abbildung 41: Anwendungsfenster History zur Anzeige von Messdaten in tabellarischer Form. ....	63
Abbildung 42: Auswahlfenster der abzuspeichernden Datensätze.....	63
Abbildung 43: Human Machine Interface des Test Modes.....	64
Abbildung 44: Auszug aus Tagesverlaufsdaten des 12.09.2013. ....	66
Abbildung 45: Temperaturverlauf der Kollektoren beim Durchzug von Wolken. ....	67
Abbildung 46: Auszug aus Tagesverlaufsdaten (Datensatz 2013-06-24).....	68
Abbildung 47: Temperaturverlauf der Kollektoren bei einer konstanten effektiven Einstrahlung von ca. $900 \text{ W/m}^2$ .....	70

Abbildung 48: Stellwinkel $\Phi$ der SCAs 1 bis 4 in Abhängigkeit der Zeit. ....	70
Abbildung 49: Steuerungsansicht Solar Mirror Panels nach Auslösen des Übertemperaturschutzes und erfolgter Abkühlung der SCAs. ....	71
Abbildung 50: Schema der zu simulierenden Anlage (nach P&ID [21]). ....	88
Abbildung 51: Übersicht über die VI-Hierarchie der Simulationssoftware. ....	89
Abbildung 52: Steuerungsansicht Overall View. ....	90
Abbildung 53: Steuerungsansicht Hot Salt Tank. ....	91
Abbildung 54: Steuerungsansicht Cold Salt Tank. ....	92
Abbildung 55: Steuerungsansicht Solar Mirror Panels. ....	93
Abbildung 56: Ansicht zur Initialisierung des Test Modes. ....	94
Abbildung 57: Hauptansicht des Test Modes. ....	95
Abbildung 58: Anwendungsfenster Chart des Test Modes. ....	96
Abbildung 59: Anwendungsfenster History des Test Modes. ....	97
Abbildung 60: Auswahlfenster der abzuspeichernden Datensätze des Test Modes. ....	98



# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auflistung und Beschreibung der einzelnen Anlagenkomponenten [21].	22
Tabelle 2: Spezifikation der Eingangsparameter von VSF.	32
Tabelle 3: Spezifikation der Ausgangsparameter von VSF.	32
Tabelle 4: Visuelle Zustände der Kollektoren.	40
Tabelle 5: Visuelle Zustände der Pumpen.	46
Tabelle 6: Visuelle Zustände der Ventile.	51



# Literaturverzeichnis

- [1] R. Klingholz, „Berliner Institut für Bevölkerung und Entwicklung,“ [Online].  
Available: <http://www.berlin-institut.org/online-handbuchdemografie/umwelt/energie.html>. [Zugriff am 15 07 2017].
- [2] BP, „BP Energy Outlook 2017,“ [Online].  
Available: [http://www.bp.com/content/dam/bp-country/de\\_de/PDFs/energieanalysen/bp-energy-outlook-2017.pdf](http://www.bp.com/content/dam/bp-country/de_de/PDFs/energieanalysen/bp-energy-outlook-2017.pdf). [Zugriff am 05 07 2017].
- [3] DLR, „Linienfokussierende Systeme - Bewährte Technologie mit Entwicklungspotential,“ [Online].  
Available: [http://www.dlr.de/sf/desktopdefault.aspx/tabid-7088/18782\\_read-43608/](http://www.dlr.de/sf/desktopdefault.aspx/tabid-7088/18782_read-43608/). [Zugriff am 10 07 2017].
- [4] BINE Informationsdienst, „Solarthermische Kraftwerke,“ [Online].  
Available: [http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Themen-Infos/II\\_2013/themen\\_0213\\_internetx.pdf](http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Themen-Infos/II_2013/themen_0213_internetx.pdf). [Zugriff am 01 07 2017].
- [5] DLR, „Das DLR im Überblick,“ [Online].  
Available: [http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10443/637\\_read-251/#/gallery/8570](http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10443/637_read-251/#/gallery/8570). [Zugriff am 03 07 2017].
- [6] DLR, „Konzentrierende Solarsysteme für die Wärme-, Strom- und Brennstoffherzeugung,“ [Online].  
Available: [http://www.dlr.de/sf/de/desktopdefault.aspx/tabid-7128/15166\\_read-37505/](http://www.dlr.de/sf/de/desktopdefault.aspx/tabid-7128/15166_read-37505/). [Zugriff am 06 07 2017].
- [7] DLR, „Energieforschung am DLR,“ [Online].  
Available:  
[http://www.dlr.de/sf/Portaldata/73/Resources/dokumente/institut/solarforschung/Energieforschung\\_im\\_DLR.pdf](http://www.dlr.de/sf/Portaldata/73/Resources/dokumente/institut/solarforschung/Energieforschung_im_DLR.pdf). [Zugriff am 13 07 2017].

- [8] DLR, „Institut für Solarforschung,“ [Online].  
Available:  
[http://www.dlr.de/sf/Portaldata/73/Resources/dokumente/folder\\_flyer\\_-\\_sf/Folder\\_DLR\\_Solar\\_Research-EN-0814-online.pdf](http://www.dlr.de/sf/Portaldata/73/Resources/dokumente/folder_flyer_-_sf/Folder_DLR_Solar_Research-EN-0814-online.pdf). [Zugriff am 13 07 2017].
- [9] A. Buck, „Parabolic trough,“ 16 02 2008. [Online].  
Available: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3569495>.  
[Zugriff am 01 07 2017].
- [10] DLR, „Linienfokussierende Systeme - Flüssigsalzsysteme,“ [Online].  
Available: [http://www.dlr.de/sf/desktopdefault.aspx/tabid-10647/18795\\_read-44147/](http://www.dlr.de/sf/desktopdefault.aspx/tabid-10647/18795_read-44147/). [Zugriff am 13 07 2017].
- [11] Falcheta, Massimo et al., „Comissioning of the Archimede 5 MW Molten Salt Parabolic Trough Solar Plant,“ 2010.
- [12] Kearney, D. et al., „Assesment of a Molten Salt Heat Transfer Fluid in a Parabolic Trough Solar Field,“ 2013.
- [13] DLR, „Parabolic Trough Solar Power Station with Thermal Storage and Molten Salt as Heat Transfer Medium,“ (*Presentation*), 19 01 2017.
- [14] DLR, „Skizze für das Verbundprojekt HPS2 - Industrie,“ 11 11 2015.
- [15] DLR, „Stellenbeschreibung Bachelorarbeit Timo Hirsch,“ (*Internal documentation*), 2017.
- [16] D. M. Wittmann, „The Évora Molten Salt Plattform – Anlagenkonzept und Testmöglichkeiten,“ [Online].  
Available:  
[http://www.dlr.de/sf/Portaldata/73/Resources/dokumente/soko/soko2017/presentationen/DLR-Sonnenkolloquium2017\\_Evora\\_-\\_Michael\\_Wittmann\\_fin.pdf](http://www.dlr.de/sf/Portaldata/73/Resources/dokumente/soko/soko2017/presentationen/DLR-Sonnenkolloquium2017_Evora_-_Michael_Wittmann_fin.pdf).  
[Zugriff am 12 07 2017].
- [17] Wittmann, Michael et al., „Solar Field Operational Modes and Functional Description of the Molten Salt Test Loop in Evora,“ (*PO0718*), 05 09 2013.



- [18] TSK Flagsol, „Functional Description FSC,“ (*HPS/01/F/-----112--/DM002*), 13 03 2017.
- [19] DLR, „Functional Description Molten Salt Cycle,“ (*HPS/01/D----126--/DM/002*), 19 04 2017.
- [20] DLR, „Product Backlog,“ (*Internal documentation*), 29 07 2017.
- [21] Solar Millenium, „Referenzen am Weltmarkt: Die Andasol-Kraftwerke,“ [Online]. Available:  
[http://www.solarmillennium.de/Technologie/Referenzprojekte/Andasol/Die\\_Andasol\\_Kraftwerke\\_entstehen\\_.cat109,art155.html](http://www.solarmillennium.de/Technologie/Referenzprojekte/Andasol/Die_Andasol_Kraftwerke_entstehen_.cat109,art155.html). [Zugriff am 14 07 2017].
- [22] DLR, „ Molten Salt Test Loop Evora Project HPS2,“ *P&I Diagram*, 13 04 2017.
- [23] T. Hirsch, „Storage Tank Modeling,“ (*Internal presentation*), 17 06 2017.
- [24] Linde, „General Arrangement Drawing - Drainage Tank,“ (*&KT-B-ZA 1001.001*), 12 01 2017.
- [25] K. Noureldin, T. Hirsch, R. Pitz-Paal, „Virtual solar field - An opportunity to optimize transient processes in line-focus CSP,“ 2017. [Online]. Available: <http://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.4984553>. [Zugriff am 14 07 2017].
- [26] K. Noureldin, T. Hirsch, R. Pitz-Paal, „Virtual Solar Field - Validation of a detailed transient simulation tool for,“ *Solar Energy*, 04 2017.
- [27] ScienceDirect, „Solar Energy,“ [Online]. Available:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X17301226?via%3Dihub>. [Zugriff am 14 07 2017].
- [28] Noureldin, Kareem et al., „Modelling and optimization of transient processes in line focusing power plants with,“ 2016. [Online]. Available: <http://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.4949169>. [Zugriff am 14 07 2017].

- [29] H. Schenk, M. Eck, „Yield Analysis for Parabolic Trough Solar Thermal Power Plants – A Basic Approach,“ DLR report for enerMena project, 2012.
- [30] Högemann, Daniel, „Expertengespräch,“ June 2017.
- [31] Noureldin Kareem, „Expertengespräch,“ June 2017.
- [32] Hirsch, Tobias (editor), „SolarPACES Guideline for Bankable STE Yield Assessment,“ 2017. [Online].  
Available:  
[http://www.solarpaces.org/images/SolarPACES\\_Guideline\\_for\\_Bankable\\_STE\\_Yield\\_Assessment\\_-\\_Version\\_2017.pdf](http://www.solarpaces.org/images/SolarPACES_Guideline_for_Bankable_STE_Yield_Assessment_-_Version_2017.pdf). [Zugriff am 05 07 2017].
- [33] H. D. Baehr, S. Kabelac, Thermodynamik : Grundlagen und technische Anwendungen, Springer Vieweg, 2016.
- [34] Siegel et al., „Thermophysical Property Measurement of Nitrate Salt Heat Transfer Fluids,“ (*ASME Conference Proceedings*), 2011.
- [35] DLR, „Calculation basis for HMBD,“ (*Internal documentation*), 23 06 2017.
- [36] SIEMENS, „SPPA-T3000, Operation User Guide (8/23),“ 21 08 2014.
- [37] Ciemat, „Plataforma Solar de Almeria (Dissemination brochure of PSA),“ 2013. [Online].  
Available:  
[http://www.psa.es/en/instalaciones/pdf/Folleto%20PSA%202013\\_EN\\_131202.pdf](http://www.psa.es/en/instalaciones/pdf/Folleto%20PSA%202013_EN_131202.pdf). [Zugriff am 06 07 2017].
- [38] K. Schwaber, S. Jeff, „The Scrum Guide,“ July 2017.

# Anhang

## A1 Anlagenschema

Siehe nächste Seite.



## A2 VI-Hierarchie

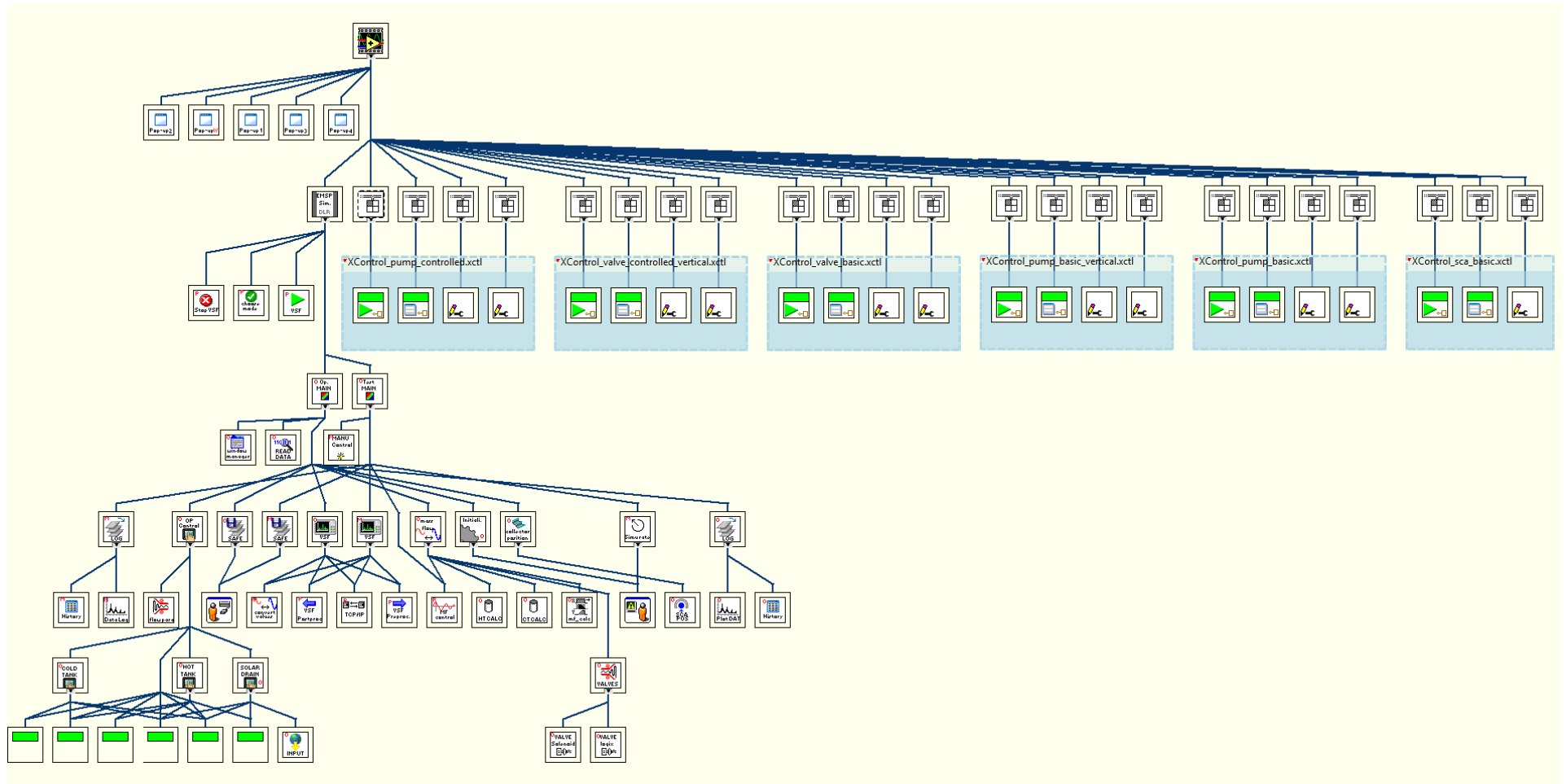
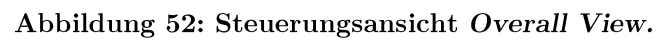
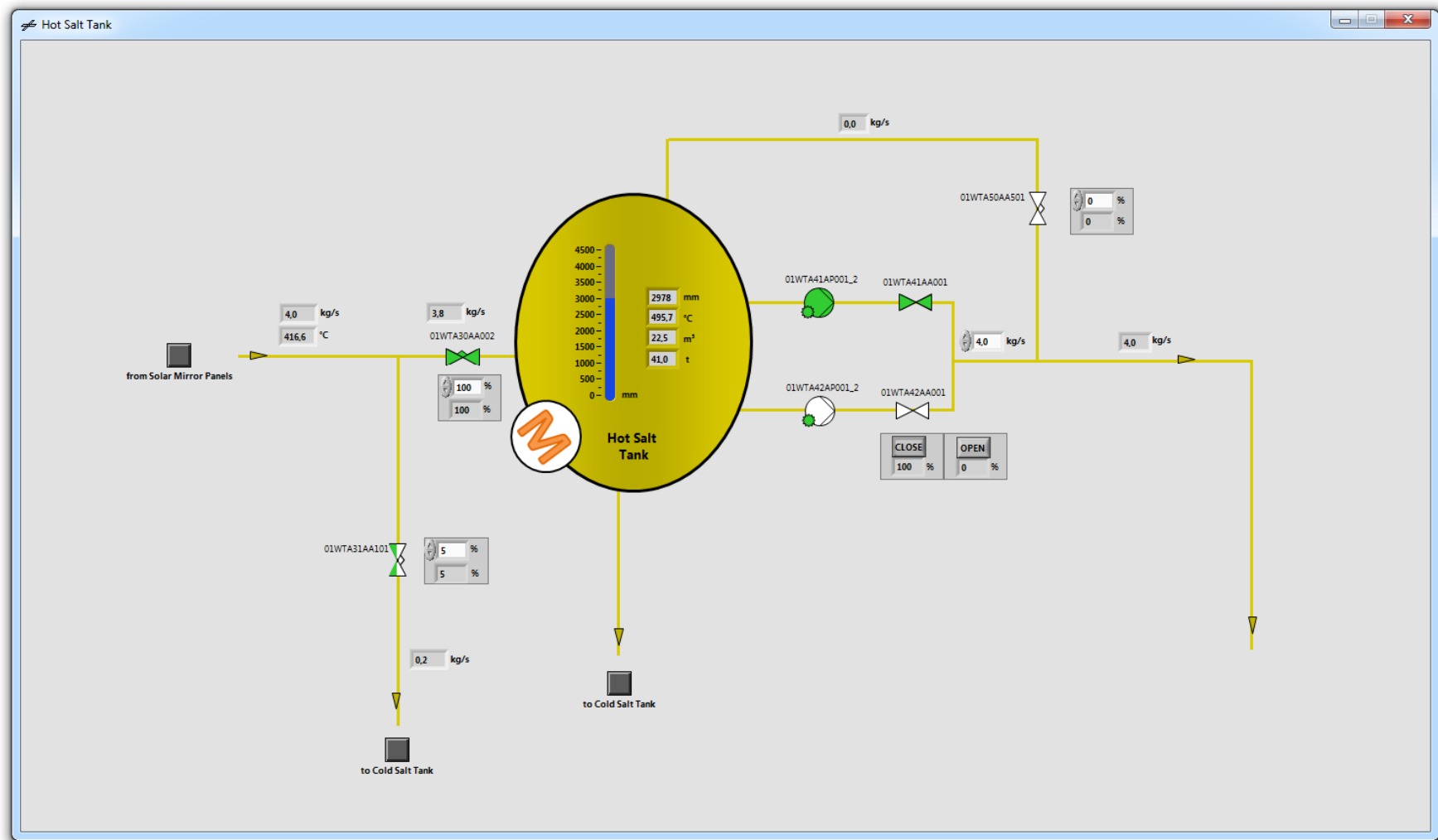


Abbildung 51: Übersicht über die VI-Hierarchie der Simulationssoftware.



Abbildung 53: Steuerungsansicht *Hot Salt Tank*.





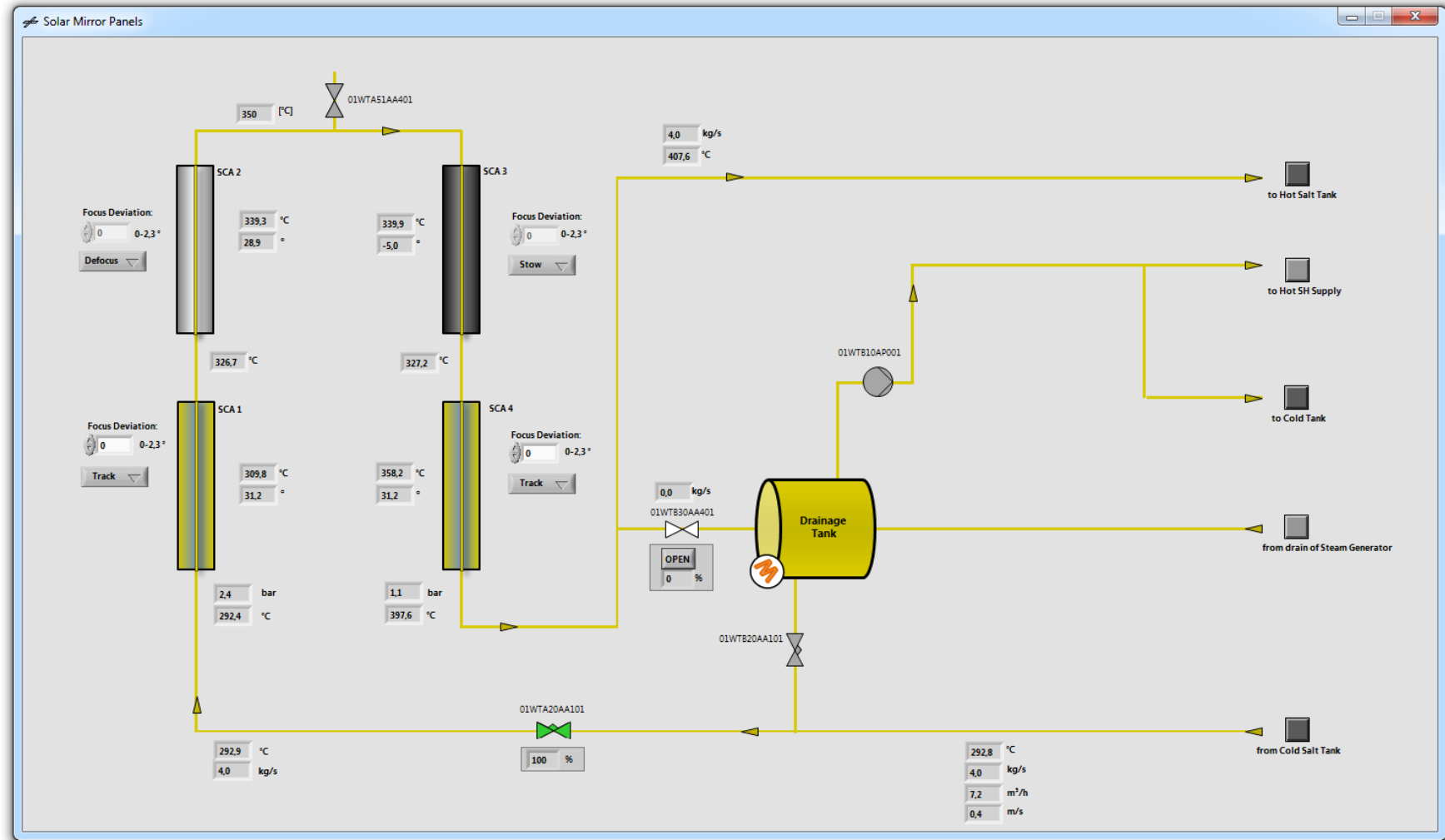


Abbildung 55: Steuerungsansicht *Solar Mirror Panels*.

## A4 Bedienoberfläche *Test Mode*

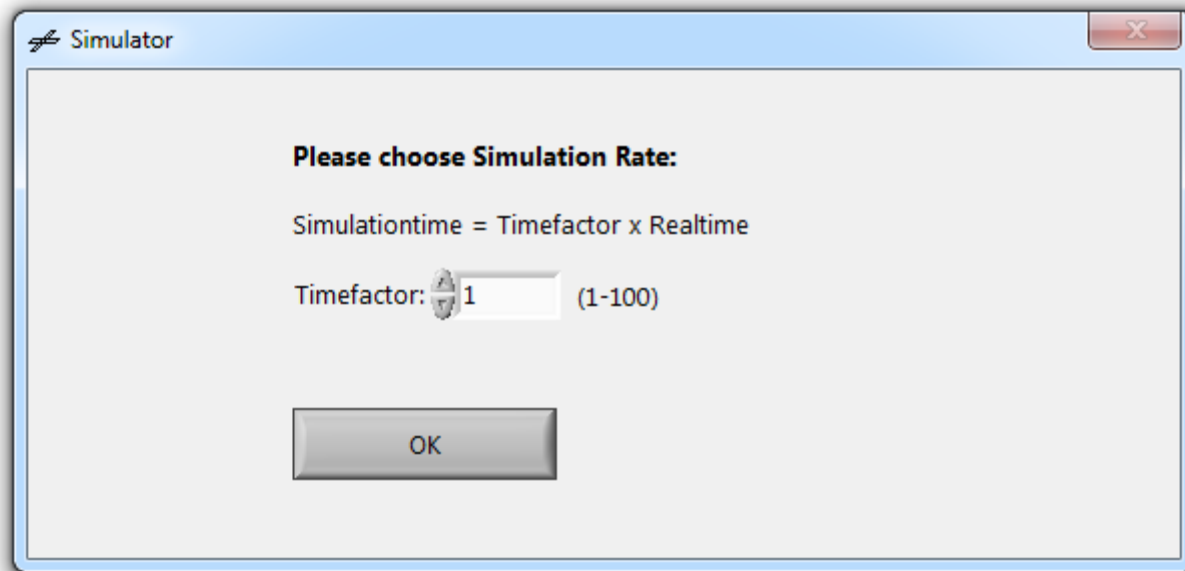
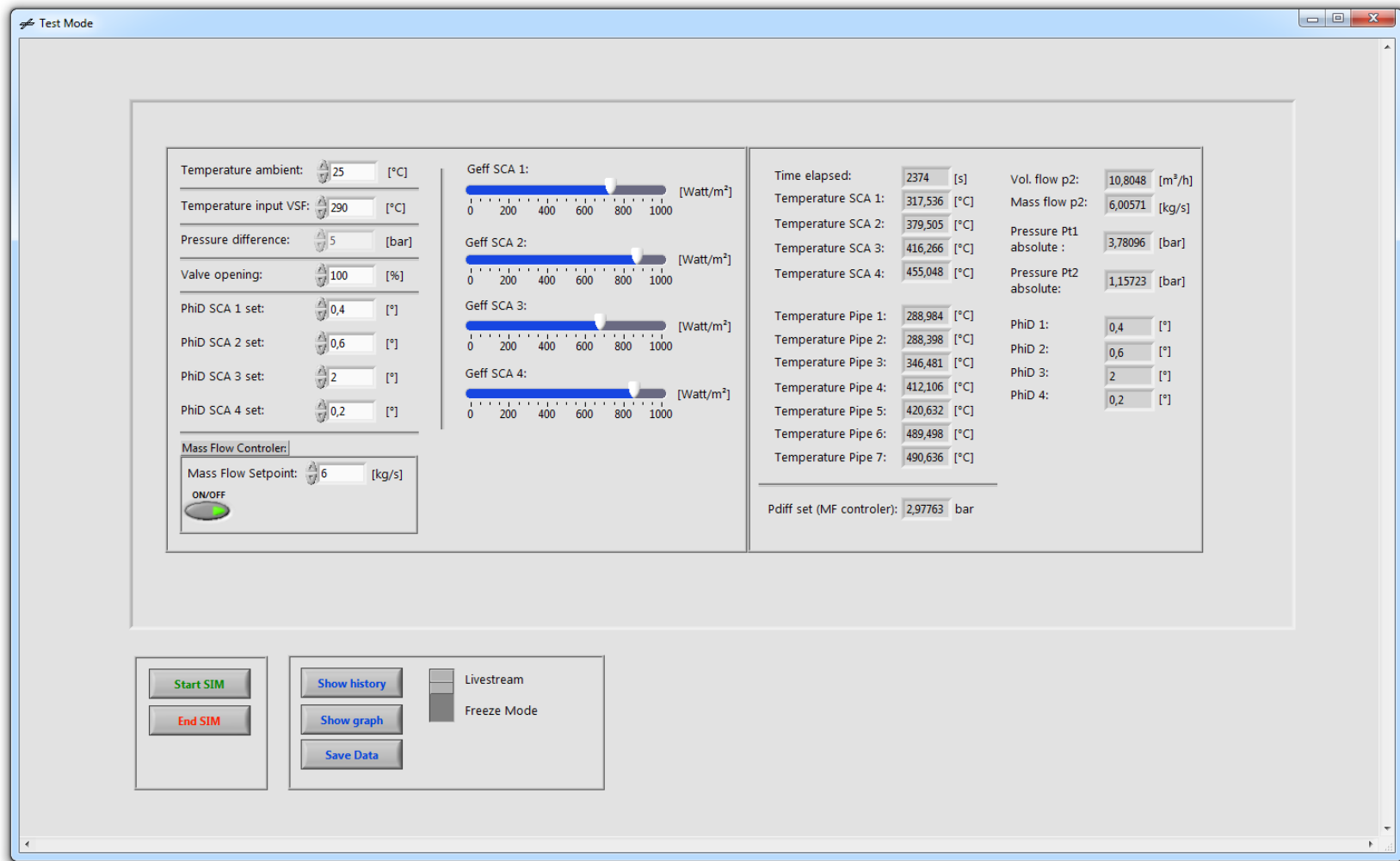


Abbildung 56: Ansicht zur Initialisierung des *Test Modes*.

Abbildung 57: Hauptansicht des *Test Modes*.

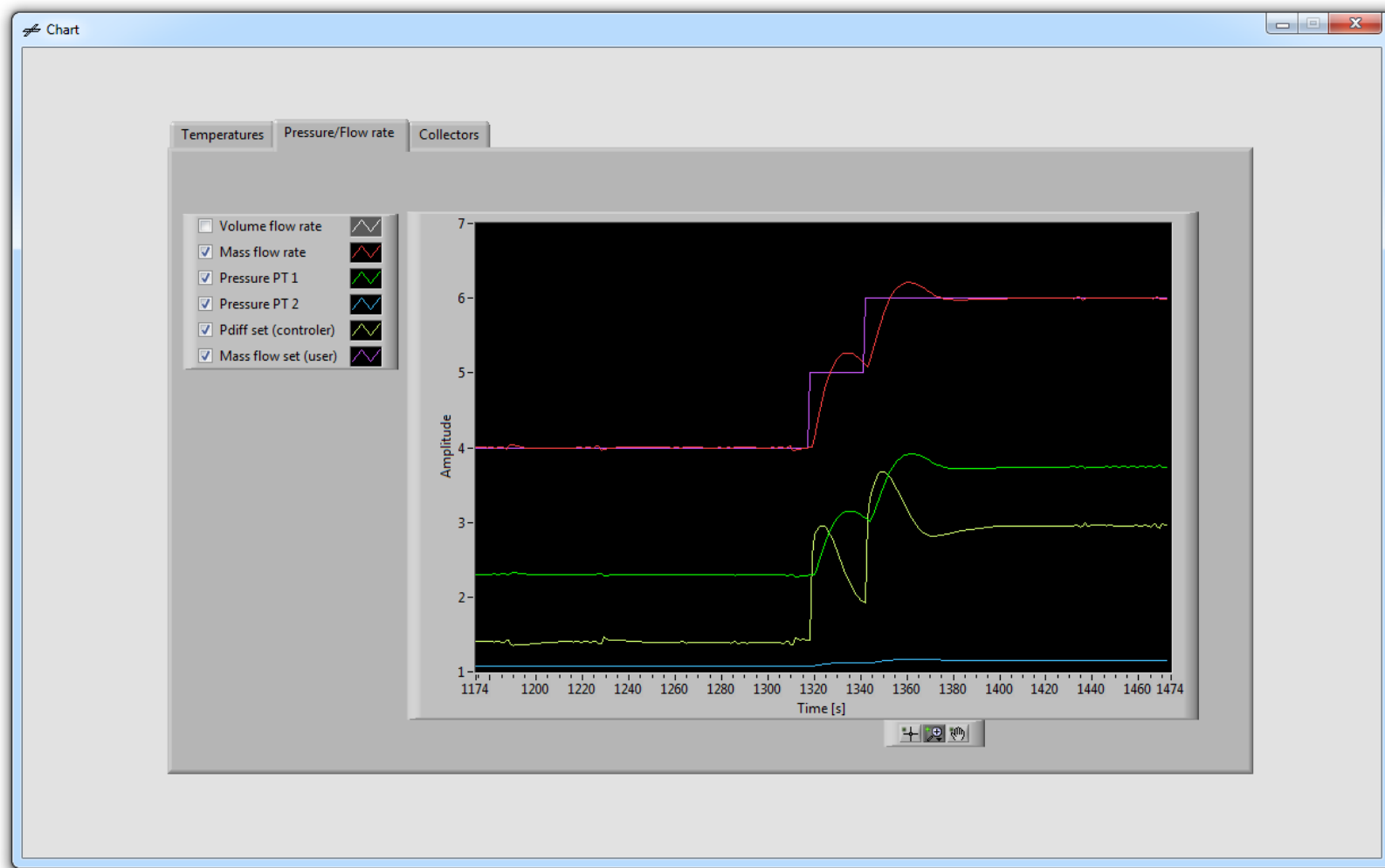


Abbildung 58: Anwendungsfenster *Chart* des *Test Modes*.

History

Temperatures Pressure/Flow Rate Collectors

0	1392	1393	1394	1395	1396	1397	1398	1399	1400	1401	1402	1403	1404	1405	1406	Time
0	322,872	322,765	322,659	322,554	322,45	322,347	322,244	322,143	322,042	321,942	321,843	321,745	321,648	321,551	321,456	Temp. SCA 1 [°C]
	417,098	416,945	416,792	416,639	416,486	416,334	416,181	416,029	415,876	415,724	415,572	415,419	415,267	415,115	414,963	Temp. SCA 2 [°C]
	470,435	470,534	470,63	470,725	470,818	470,909	470,998	471,084	471,169	471,252	471,333	471,412	471,489	471,564	471,637	Temp. SCA 3 [°C]
	462,49	462,667	462,845	463,024	463,203	463,383	463,564	463,746	463,928	464,11	464,294	464,478	464,663	464,849	465,035	Temp. SCA 4 [°C]
	288,72	288,725	288,729	288,733	288,737	288,741	288,746	288,75	288,754	288,758	288,762	288,766	288,77	288,774	288,778	Temp. Pipe 1 [°C]
	287,893	287,898	287,902	287,906	287,911	287,915	287,919	287,924	287,928	287,932	287,937	287,941	287,945	287,949	287,954	Temp. Pipe 2 [°C]
	365,366	365,235	365,103	364,972	364,841	364,71	364,578	364,447	364,316	364,185	364,053	363,922	363,791	363,66	363,529	Temp. Pipe 3 [°C]
	467,678	467,555	467,432	467,308	467,183	467,058	466,933	466,807	466,68	466,553	466,425	466,297	466,168	466,039	465,909	Temp. Pipe 4 [°C]
	452,414	452,649	452,883	453,116	453,348	453,58	453,81	454,039	454,267	454,495	454,721	454,946	455,17	455,393	455,616	Temp. Pipe 5 [°C]
	480,433	480,539	480,645	480,752	480,86	480,969	481,079	481,189	481,3	481,413	481,525	481,639	481,754	481,869	481,985	Temp. Pipe 6 [°C]
	464,517	464,656	464,795	464,935	465,074	465,214	465,353	465,493	465,633	465,772	465,912	466,052	466,191	466,331	466,47	Temp. Pipe 7 [°C]

Abbildung 59: Anwendungsfenster *History* des *Test Modes*.

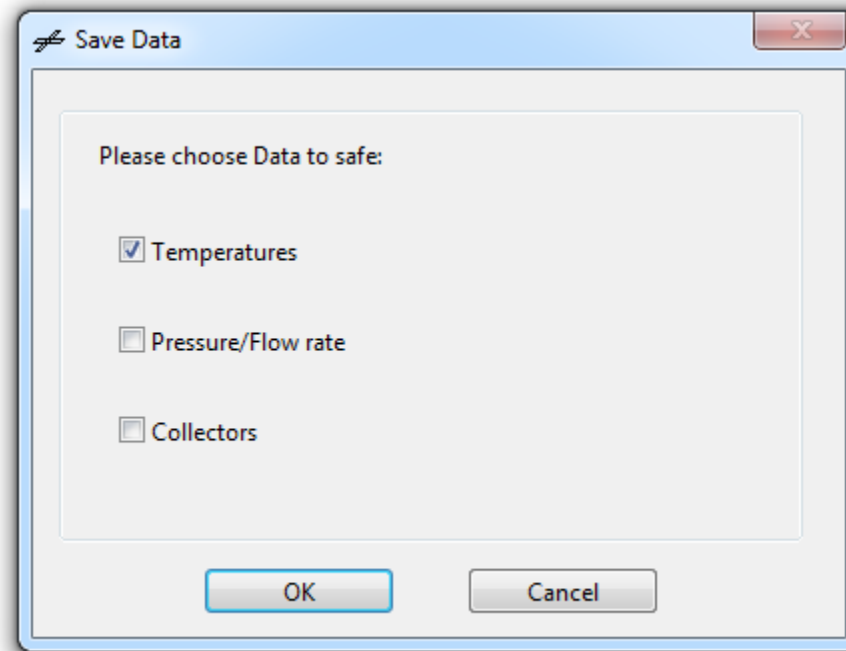


Abbildung 60: Auswahlfenster der abzuspeichernden Datensätze des *Test Modes*.